

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi aerodinàmic d'un vehicle de sèrie, amb diferents configuracions (descapotable o no)**

**MEMORIA**

**Autor:** Marc Gómez Rovira

**Director** Enric Trillas Gay

**Convocatòria** Octubre 2016

Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

Aquest projecte es basa en l'estudi aerodinàmic d'un vehicle de sèrie amb dues possibles configuracions: descapotable o no. Es realitzarà una comparació aerodinàmica del mateix model de turisme, amb l'objectiu de visualitzar el comportament de l'aire en ambdues superfícies i al voltant dels dos vehicles. Aquest treball constarà d'una part teòrica introductòria i de l'estudi 3D d'ambdues configuracions mitjançant un codi CFD - Dinàmica Computacional de Fluids, sigles en anglès. Posteriorment es trauran les conclusions d'aquesta comparativa i es realitzarà l'estudi dels costos i del possible impacte mediambiental. El cotxe el qual s'ha escollit per al disseny és un Volkswagen NewBeetle del 2009.

Per al disseny de les superfícies que representaran el model s'ha utilitzat la eina CAD - Disseny Assistit per Ordinador, sigles en anglès - *CATIA V5 R20*. Per a l'estudi aerodinàmic del comportament de l'aire s'ha introduït ambdues geometries al programa de simulació *FLUENT*.

El disseny del vehicle s'ha realitzat amb l'ajuda dels plans del vehicle i intentant reproduir al màxim les corbes que aquest presenta

El següent pas ha estat crear el mallat - el qual s'explicarà amb detall posteriorment - i llençar les simulacions del comportament del fluid sobre la superfície o pell dels vehicles.

Per últim, s'interpretaran els resultats obtinguts de la resistència a l'avanç de les dues configuracions, amb una hipòtesi de partida: el vehicle descapotable presentarà un coeficient de resistència a l'avanç molt major al que s'obtindrà amb el vehicle que no és descapotable.



## **INDEX**

## **RESUM**

### **1. NOMENCLATURA**

### **2. PREFACI**

### **3. INTRODUCCIÓ**

#### 3.1. Objectius i abast

### **4. L'AERODINÀMICA EN EL VEHICLE**

#### 4.1. Situació històrica

#### 4.2. Teoria de la dinàmica de fluids

#### 4.3. Elements del vehicle que influeixen en l'aerodinàmica

##### 4.3.1. Para-xocs davanter

##### 4.3.2. Inclinació del capó i del parabrises davanter

##### 4.3.3. Xassís superior o sostre

##### 4.3.4. Parabrises posterior i maleter

##### 4.3.5. Lateral

##### 4.3.6. Rodes i baixos

### **5. DINÀMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDS**

#### 5.1. Introducció

#### 5.2. Estudi

#### 5.3. Disseny dels models

#### 5.4. Mallat

#### 5.5. Condicions de contorn

#### 5.6. Càlcul de la solució

## **6. RESULTATS I INTERPRETACIÓ**

6.1.  $C_D$ ,  $C_L$  i  $M$ .  $F_D$  i  $F_L$

6.2. Pressions

6.3. Velocitats

## **7. ESTUDI DE COSTOS**

## **8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL**

## **9. CONCLUSIONS I POSSIBLES MILLORES**

## **BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA**

## ÍNDIX DE FIGURES

Fig.4.1.1: Força realitzada per un fluid - aire - en funció de la velocitat

Fig.4.2.1.: Valor de  $C_D$  en funció de la geometria on impacta el fluid

Fig.4.2.2.: Perfil de la capa límit

Fig.4.3.2.1.: Valor del *lift* en funció de l'angle del capó

Fig.4.3.2.2.: Valor de  $C_D$  en funció dels angles del parabrises davanter i del capó

Fig.4.3.4.1.: Valor de  $C_D$  en funció de l'angle del parabrises posterior

Fig.5.2.1.: Exemple del mallat d'un volum de control

Fig.5.3.1.: Blueprints del Volkswagen NewBeetle del 2009

Fig.5.3.2.: Disseny mitjançant *Catia* del vehicle capotat

Fig.5.4.1.: Mallat estructural dels vehicles

Fig.5.4.2.: Volum de control de cada vehicle

Fig.5.4.3.: Mallat dels vehicles juntament amb el volum de control

Fig.5.6.1.: Representació dels residuals del vehicle capotat

Fig.5.6.2.: Representació dels residuals del vehicle descapotat

Fig.6.1.1.: Centre de masses, en negre, i centre de pressions, en vermell, del vehicle capotat

Fig.6.1.2.: Centre de masses, en negre, i centre de pressions, en vermell, del vehicle descapotable

Fig.6.1.3.:  $C_D$  del vehicle capotat

Fig.6.1.4.:  $C_L$  del vehicle capotat

Fig.6.1.5.:  $C_M$  del vehicle capotat

Fig.6.1.6.:  $C_D$  del vehicle descapotable

Fig.6.1.7.:  $C_L$  del vehicle descapotable

Fig.6.1.8.:  $C_M$  del vehicle descapotable

Fig.6.2.1.: Pressions part anterior del vehicle capotat

Fig.6.2.2.: Pressions part anterior del vehicle descapotat

Fig.6.2.3.: Pressions part posterior del vehicle descapotat

Fig.6.3.1.: Camp de velocitats anterior sobre el vehicle capotat

Fig.6.3.2.: Camp de velocitats anterior sobre el vehicle descapotable

Fig.6.3.3.: Vòrtexs posteriors sobre el vehicle capotat

Fig.6.3.4.: Vòrtexs posteriors sobre el vehicle descapotat

Fig.6.3.5.: Trajectòria de l'aire en el vehicle descapotable

Fig.7.2.: Diagrama de Gantt del projecte

Fig.7.3.: Gràfic tipus pastís dels percentatges repartits en el pressupost del projecte



## **ÍNDIX DE TAULES**

Taula 6.1.1.: Resultats anàlisis vehicles

Taula 7.1.: Activitats de projecte

Taula 7.2.: Costos globals

## 1. Nomenclatura

$A$	Àrea frontal d'impacte de fluid
$A_p$	Àrea frontal projectada
$\alpha$	Angle del capó
$a$	velocitat del so relativa al fluid d'estudi
$\delta$	Gruix capa límit
$C_D$	Coeficient aerodinàmic de resistència a l'avanç
$C_L$	Coeficient aerodinàmic de sustentació
$C_{D,f}$	Coeficient aerodinàmic de fricció
$C_{D,p}$	Coeficient aerodinàmic de pressió
$\epsilon$	Eficiència
$\varphi$	Angle del parabrises davanter
$F_D$	Força de resistència o <i>Drag</i>
$F_L$	Força de sustentació o <i>Lift</i>
KTE	Energia Cinètica de Turbulència, o <i>KineticTurbulenceEnergy</i>
$L$	Longitud característica
$\rho$	Densitat del fluid
$M$	Moment de capcineig
$\phi$	Angle parabrises posterior
$dS$	Diferencial de superfície
$t$	gruix
$U$	Velocitat del fluid

## 2. Prefaci

La indústria de l'automoció actual és un clar exemple de la optimització de recursos i reducció de costos tot atorgant als seus vehicles uns nivells de qualitat i sobretot de seguretat òptims. A la segona meitat del segle XX, aquesta indústria es va adonar que l'impacte de l'aire sobre el vehicle era molt important pel que fa a dos aspectes bàsics sobre la conducció: el consum de combustible i l'adherència a la carretera - seguretat. Aquesta observació sorgí degut a la crisi del petroli dels anys 70, fet que va provocar que les empreses destinessin recursos econòmics per a la creació d'un xassís eficient per a minorar el consum de combustible de l'automòbil - tant per la forma d'aquest com pels materials emprats en l'assemblatge del vehicle - per a reduir el valor del  $C_D$ . En l'actualitat, la tecnologia ajuda als tècnics a dissenyar vehicles amb la mínima resistència a l'avanç possible.

La motivació per la qual es va decidir dur a terme aquest treball sorgeix, en primera banda, per l'interès pel món de l'automoció, sobretot pel disseny industrial i l'anàlisi de mètodes numèrics. Treballar a l'empresa Robert BOSCH entenent el funcionament de servofrens va augmentar les ganes de conèixer aquest món, i amb la feina actual de dissenyador industrial va sorgir la idea de realitzar una simbiosi de coneixements adquirits en el món laboral: dissenyar dos vehicles de mateixa estructura - un d'ells descapotable -, modelitzar-los i mallar-los per a estudiar el comportament que aquests presenten a la carretera, simulant un flux d'aire en la mateixa direcció però sentit contrari als vehicles per a dotar-los de moviment.

Aquesta idea comporta, en primera banda, el disseny dels dos automòbils de mateixa geometria, però un d'ells descapotable, per a poder comparar els resultats que s'obtindran mitjançant la dinàmica computacional de fluids. L'objectiu principal del treball és demostrar la següent hipòtesi de partida: el  $C_D$  del vehicle descapotable serà superior – tindrà pitjor aerodinàmica – que el descapotable.

### 3. Introducció

#### 3.1. Objectius i abast

En primer lloc, caldrà entendre com s'apliquen els teoremes de *Mecànica de Fluids* a l'hora d'estudiar l'aerodinàmica dels turismes, fet que comporta assimilar el concepte de CFD<sup>1</sup> esmentat anteriorment.

Pel que fa al disseny, el primer obstacle del treball, cal conèixer el software CAD<sup>2</sup> amb el qual es dissenyaran les superfícies dels cotxes, ja que un resultat acurat a la realitat suposarà major precisió en els resultats obtinguts. Tant l'assignatura *Dibuix Assistit per Ordinador* com la feina actual de dissenyador han ajudat a que aquesta tasca fos senzilla.

La intenció d'aquest projecte és materialitzar amb resultats coherents l'aprenentatge a l'assignatura *Mecànica de Fluids*. Relacionar aquest aspecte amb l'aerodinàmica que presenten els vehicles significa realitzar el càlcul de les forces que actuen sobre les superfícies d'aquests i els respectius coeficients aerodinàmics:  $C_D$ <sup>3</sup> o força de resistència a l'avanç i  $C_L$ <sup>4</sup> o força de sustentació.

Aquest tipus d'estudi que es vol realitzar és bàsic en les empreses automobilístiques actuals: aquestes realitzen estudis aerodinàmics a l'hora de dissenyar un nou vehicle i posar-lo al mercat, sobretot si no disposen de túnels de vent i sensors sobre la superfície per a fer lectures de les velocitats i pressions de l'aire en punts determinats de la pell del vehicle. Com s'ha esmentat anteriorment, el cotxe a modelar serà un Volkswagen NewBeetle del 2009, el qual es dissenyarà primerament capotat i, un cop es realitzi la primera simulació, es dissenyarà el mateix model però aquest cop descapotable, per a fer les comparacions aerodinàmiques i assolir l'abast d'aquest projecte.

Per últim, s'estudiarà un estudi econòmic i temporal i del possible impacte mediambiental que suposa realitzar aquest treball.

---

<sup>1</sup> CFD: Dinàmica Computacional de Fluids, en anglès

<sup>2</sup> CAD: Disseny Assistit per Computadora, en anglès

<sup>3</sup>  $C_D$ : Coeficient aerodinàmic de resistència a l'avanç, o *Drag*, en anglès

<sup>4</sup>  $C_L$ : Coeficient aerodinàmic de sustentació, o *Lift*, en anglès

## 4. L'aerodinàmica en el vehicle

### 4.1. Situació històrica

Amb l'objectiu principal de reduir costos i augmentar l'adherència sobre la carretera - objectiu imposat per la crisi del petroli a la segona meitat del segle XX - les empreses van augmentar els recursos destinats a millorar l'aerodinàmica dels vehicles que produïen. Es pot veure en la següent figura com l'aerodinàmica influeix en la resistència a l'avanç que presenta un sòlid - fet que ensenya la vital importància que cal destinar a realitzar una superfície que presenti una baixa resistència a l'avanç - i és degut sobretot a la velocitat relativa que presenta el sòlid envers el fluid, en aquest cas aire.

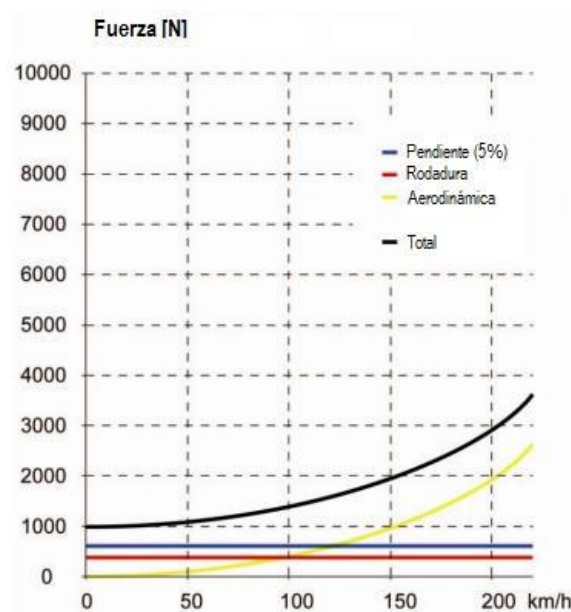


Fig.4.1.1: Força realitzada per un fluid - aire - en funció de la velocitat [1]

Aquesta resistència a l'avanç és una suma de dos components: la resistència a l'avanç de fricció o resistència de superfície, i de pressió o resistència de forma. L'esforç tallant que rep cada diferencial de superfície  $dS$  del vehicle produït per la viscositat de l'aire és el que es coneix com a resistència de fricció. Altrament, la variació de pressions que existeixen en la zona frontal del vehicle, on hi ha zones d'alta pressió o estancament, i en la zona posterior, on hi ha separació de flux i per tant baixa pressió, és el que es coneix com a resistència de pressió.

$$C_D = C_{D,p}^5 + C_{D,f}^6$$

<sup>5</sup>  $C_{D,p}$ : Resistència a l'avanç de fricció o resistència de superfície

<sup>6</sup>  $C_{D,f}$ : Resistència a l'avanç de pressió o resistència de forma

## 4.2. Teoria de la dinàmica de fluids

La importància d'aquest components per separat en el  $C_D$  resideix en la geometria del sòlid i del seu gruix  $t^7$ . La següent figura, extreta del material docent de l'assignatura *Mecànica de Fluids*, mostra la relació existent entre la forma del sòlid i el  $C_D$

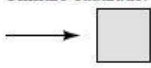
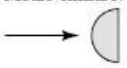

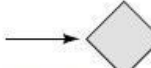
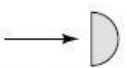

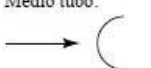
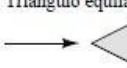
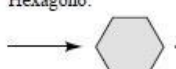


Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal
Cilindro cuadrado: 	2,1	Medio cilindro: 	1,2	Placa: 	2,0
	1,6		1,7	Placa plana perpendicular a pared: 	1,4
Medio tubo: 	1,2	Triángulo equilátero: 	1,6	Hexágono: 	1,0
	2,3		2,0		0,7

Fig.4.2.1.: Valor de  $C_D$  en funció de la geometria on impacta el fluid [2]

Però no només és important la geometria del sòlid per com impacte amb l'aire per la part anterior, sinó també com es desprèn aquest fluid per la part posterior: els vehicles a dissenyar deixaran rere seu una estela turbulenta d'aire, la qual serà diferent per a cada configuració del vehicle, i serà de vital importància observar les variacions existents entre ambdues turbulències.

L'efecte de la turbulència és deguda al fenomen físic del desprendiment de la capa límit: quan s'aplica un flux d'aire perpendicular a una superfície, existeix un gradient de velocitats del fluid en la normal a la superfície esmentada, on la velocitat passa de ser nul·la sobre cada  $dS^8$  d'aquesta corba fins a assolir la velocitat uniforme aplicada pel flux, fet que succeeix a una alçada determinada  $\delta^9$ , coneguda com gruix de la capa límit. A partir d'aquest punt, i perpendicular a la superfície novament, no hi ha gradient de velocitats en l'aire, o el que és el mateix,  $du/dy = 0$ . Aquest gruix  $\delta$  és funció de la viscositat del fluid i de l'esforç tangencial que provoca sobre la corba, i es determina quan la velocitat del fluid és  $0.99 \cdot U^{10}$ .

<sup>7</sup> t: Gruix del sòlid

<sup>8</sup>  $dS$ : Diferencial de superfície

<sup>9</sup>  $\delta$ : Gruix de la capa límit

<sup>10</sup>  $U$ : Velocitat del fluid

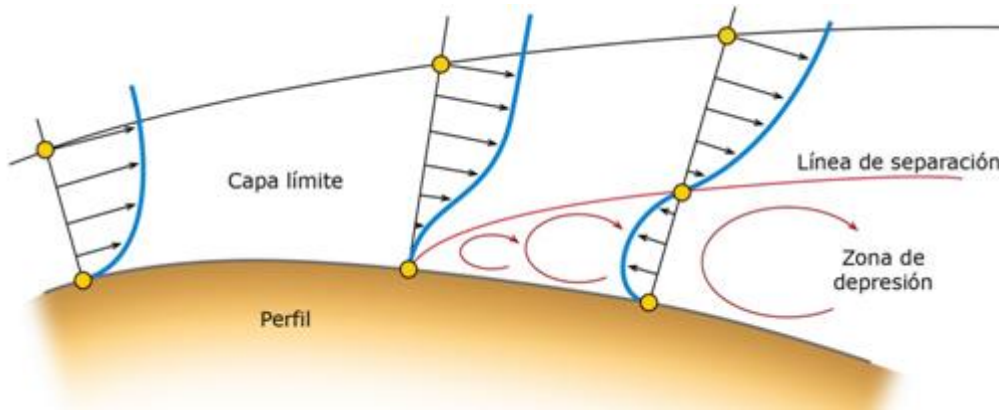


Fig.4.2.2.: Perfil de la capa límit [3]

Els esforços tallants - produïts pel contacte de l'aire amb la pell del sòlid i per la viscositat del fluid - que apareixen a cada  $dS$  de la superfície són els que defineixen la força de fricció i un moment  $M^{11}$  que pateix el sòlid. Aquesta força és la resultant de dues components: la força de sustentació i la força de resistència.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot Ap$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot U^2 \cdot Ap$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot C_M \cdot \rho \cdot U^2 \cdot Ap \cdot L, \text{ on:}$$

$F_D$  = Força resistència a l'avanç

$F_L$  = Força resistència sustentació

$M$  = Moment de capcineig

$C_D$  = Coeficient resistència a l'avanç

$C_L$  = Coeficient resistència a sustentació

$C_M$  = Coeficient resistència de moment de capcineig

$\rho$  = Densitat de l'aire, de valor  $1,25 \text{ kg/m}^3$

$U$  = Velocitat del fluid aire

$Ap$  = Àrea frontal projectada

Per estudiar el comportament aerodinàmic dels vehicles, el factor a tenir en compte sobre els altres dos serà el  $F_D$ <sup>12</sup>. Aquest vindrà influenciat pel coeficient de resistència a l'avanç  $C_D$ , fet que variarà en funció de les diferents superfícies a modelitzar, tals com el para-xocs, vidre davanter, xassís i rodes.

---

<sup>11</sup> M: Moment de capcineig

<sup>12</sup>  $F_D$ : Força de resistència a l'avanç, en funció de  $C_D$



### 4.3.Elements del vehicle que influeixen en l'aerodinàmica

En aquest capítol s'estudiarà les diferents superfícies dels vehicles i com influeixen en la aerodinàmica. Agafant les superfícies esmentades anteriorment, podem estudiar els següents casos:

#### 4.3.1.Para-xocs davanter

És el primer dels obstacles amb què es troba l'aire: el disseny del para-xocs permetrà desviar el flux d'aire cap a la resta del vehicle, fet que implica que caldrà dissenyar un para-xocs eficient pel que fa a l'aerodinàmica.

Quan l'aire impacta ortogonalment al para-xocs davanter es crea un punt d'estancament, fet que significa una velocitat nul·la del fluid i una zona de màxima pressió.

És per aquest fet que caldrà dissenyar un para-xocs davanter sense cants vius, amb una superfície corba i suau, sense canvis bruscs, per intentar que la zona d'estancament impacti sobre la superfície mínima possible.

#### 4.3.2.Inclinació del capó i del parabrises anterior

L'angle  $\alpha$  del capó influeix en la trajectòria que seguirà el fluid de l'aire un cop superat el primer obstacle, que és el para-xocs davanter. En la següent figura es pot observar com fins un valor  $\alpha^{13} = 8^\circ$  el  $C_D$  es pot considerar raonablement constant, però a partir d'aquest valor augmenta exponencialment. S'intentarà dissenyar un valor de l'angle d'atac tal que el capó tingui un *Drag* equivalent a un angle  $\alpha \leq 8^\circ$ .

També es pot observar que existeix una relació lineal entre el valor del *Lift* i l'angle del capó.

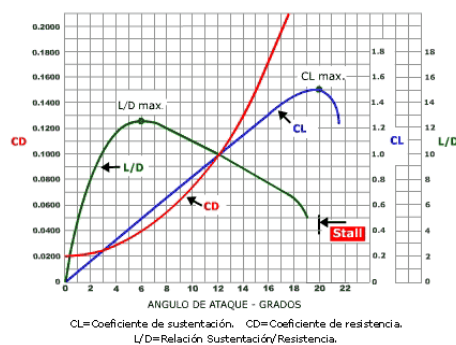


Fig.4.3.2.1.: Valor del *lift* en funció de l'angle del capó [4]

<sup>13</sup>  $\alpha$ : Angle d'atac del capó

Pel que fa a la inclinació  $\varphi^{14}$  del parabrises davanter, cal tenir en compte que com més petit és aquest valor, l'impacte amb l'aire és més brusc, fet que fa augmentar el  $C_D$ . Per tant, és important disposar d'un angle  $35^\circ \leq \varphi \leq 65^\circ$  que acoti un valor de  $C_D$  relativament baix. Un angle inferior a  $35^\circ$  provoca una àrea d'estancament elevada, i un angle superior a  $65^\circ$  provoca que calgui dissenyar un cotxe molt elevat per a acollir el conductor a dins.

Aquest recull es posa en manifest gràficament en la següent imatge:

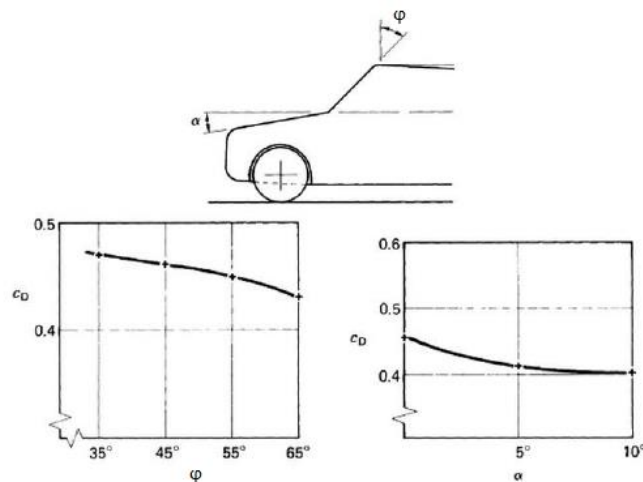


Fig.4.3.2.2.: Valor de  $C_D$  en funció dels angles del parabrises davanter i del capó [5]

#### 4.3.3.Xassís superior o sostre

El sostre del vehicle ha de garantir que, quan el fluid circuli per aquesta zona, ho realitzi sense perdre el contacte entre fluid i pell. La pèrdua de contacte suposarà el desprendiment de la capa límit i provocarà turbulències que afectaran a l'aerodinàmica. Una major curvatura implicarà un menor desprendiment de la capa límit.

Aquest és un dels punts més importants del projecte: observar les diferències existents en l'aerodinàmica dels dos vehicles en aquest tram, ja que un cotxe disposarà de sostre i l'altre no. S'intentarà que, en el disseny del cotxe capotat, l'aire no perdi contacte fins al parabrises posterior, per tal d'observar diferències rellevants entre ambdós vehicles.

---

<sup>14</sup>  $\varphi$ : Angle del parabrises davanter

#### 4.3.4.Parabrises posterior i maleter

El cotxe capotat es pot considerar un vehicle *hatchback*<sup>15</sup>. En canvi, el cotxe descapotat es considerarà *fastback*<sup>16</sup>.

El parabrises posterior en la primera configuració cau amb un angle  $\phi$  superior a  $45^\circ$ , fet que provoca que l'aire no segueixi la silueta del vehicle i es desprengui totalment de la superfície del parabrises. Aquest fet comportarà la creació de vòrtexs just immediatament superat el sostre del vehicle.

Novament, el valor de  $\phi$  influeix en el  $C_D$  del vehicle: en la següent imatge s'observa la relació entre el  $C_D$  i l'angle  $\phi$

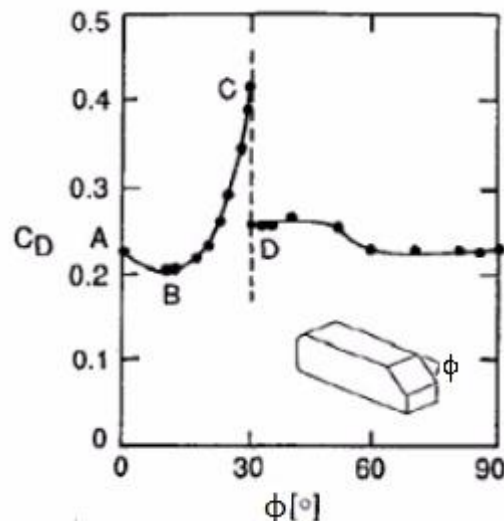


Fig.4.3.4.1.: Valor de  $C_D$  en funció de l'angle del parabrises posterior [6]

En la configuració descapotable, primerament es creu que els possibles vòrtexs que es crearan s'ubicaran a l'interior del vehicle, amb els passatgers. A les conclusions i comparativa s'avaluarà la primera hipòtesi formulada en aquest apartat.

<sup>15</sup> Hatchback: el maleter cau amb una inclinació gairebé vertical, on s'hi accedeix a través d'una porta posterior.

<sup>16</sup> Fastback: Sostre gairebé paral·lel a la cua, forma un pla continu, sol tenir coeficient aerodinàmic pitjor que la resta de vehicles

#### **4.3.5.Lateral**

Per a millorar l'aerodinàmica del vehicle - reduir el valor del  $C_D$  - cal optimitzar la forma de la geometria lateral del vehicle. Augmentar la convexitat dels laterals implica un desprendiment posterior de la capa límit, tal i com passa amb el sostre. El flux roman enganxat al xassís, però igual que en el sostre, una concavitat elevada també provoca un augment de l'àrea lateral, i això provoca un augment de  $F_D$ . És important realitzar uns dissenys on l'àrea lateral presenti concavitat però sense augmentar bruscament la superfície lateral.

#### **4.3.6.Rodes i baixos**

Juntament amb el para-xocs davanter, aquests elements del vehicle tenen gran influència en l'aerodinàmica dels turismes.

Les rodes presenten un elevat  $C_D$  degut sobretot a que no estan dissenyades per a combatre l'aerodinàmica: les rodes presenten una zona d'estancament molt elevada degut a què l'impacte amb l'aire és gairebé normal a la superfície d'aquestes en tots els punts davanterers.

Els baixos, per altra banda, presenten una superfície molt abrupta vista des del lateral del vehicle, degut a rodes, amortidors, tub d'escapament, transmissió, etc. Una possible solució per a millorar l'aerodinàmica d'aquesta zona seria tapar amb una xapa la superfície horitzontal inferior definida pel xassís del vehicle, però seria un inconvenient al detectar averies a vista. De fet, aquest és el motiu principal per a no tapar la zona esmentada i reduir el  $C_D$ .

En aquest projecte ha aparegut un problema: no ha estat possible dissenyar les rodes dels vehicles, el programa no era capaç de resoldre un croquis 3D fora de la pell del vehicle, i el que s'ha fet ha estat tapar l'espai de les rodes amb una pell. Posteriorment es veurà com el terra no ha estat ubicat a l'alçada inferior del xassís, sinó que s'ha deixat un espai per a permetre que l'aire flueixi per sota del vehicle.

## 5. Dinàmica Computacional de Fluids

### 5.1. Introducció

Per a poder modelar les equacions que defineixen el moviment dels fluids s'empren equacions en derivades parcials no lineals, tals com la conservació de la massa. Entre elles s'usen les equacions formulades per *Navier-Stokes*<sup>17</sup>, les quals governen sobre fluids newtonians<sup>18</sup>.

En el cas que comporta, caldria usar aquestes expressions en cada dV del volum de control definit que englobaria tota la superfície del vehicle, i això resultaria un càlcul destacadament elevat.

Per evitar aquesta situació, entra a escena la CDF: aquest mètode d'anàlisi substitueix les equacions en derivades parcials per expressions algebraiques que són capaces de resoldre de manera aproximada qualsevol equació relacionada amb el flux del fluid. Al ser un càlcul aproximat, permet una reducció de costos i temps raonablement acceptable en funció de l'error presentat en els resultats finals.

El procediment per a substituir les equacions en derivades parcials per equacions algebraiques comença amb la discretització de l'element a estudiar: aquest fet suposa dividir el volum de control en un conjunt d'elements finits, i en cadascun d'aquests es resolen les equacions algebraiques, arribant a un resultat aproximat que dependrà en gran part de la mida de l'element. Si es defineixen més elements i aquests són més petits, el resultat obtingut serà més proper al que s'obtingria amb *Navier-Stokes*.

---

<sup>17</sup> Navier-Stokes: Equacions en derivades parcials no lineals que descriuen el moviment d'un fluid

<sup>18</sup> Fluid newtonià: fluid la viscositat del qual roman constant per qualsevol instant de temps

## 5.2. Estudi

El principi de l'estudi es basa en realitzar aquesta discretització<sup>19</sup> mitjançant un mallat del volum de control. En cada element s'aplicaran les fórmules algebraïques i s'obtindrà un resultat aproximat. En la següent figura es pot observar el mallat d'un volum de control on es mostren tots els elements:

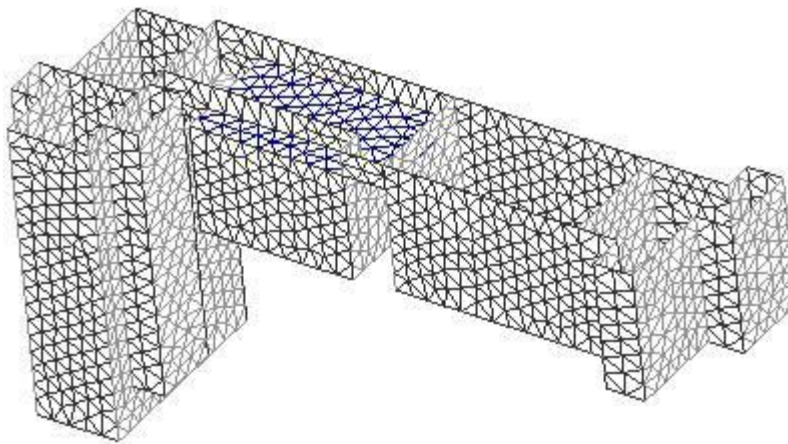


Fig.5.2.1.: Exemple del mallat d'un volum de control [7]

Concretament, el mallat és la primera etapa de les tres que proposa el CFD per a la resolució de problemes, anomenada pre-procés - on també s'hi apliquen condicions de contorn tals com restriccions de moviment. A continuació existeix la solució, on es defineix el mètode de càlcul i les iteracions necessàries per a donar validesa a aquest. S'arribarà a un valor estacionari de la solució quan el mallat sigui menor, amb una mida d'element major i amb un temps d'anàlisi menor.

Per últim s'arriba a l'anàlisi de post-procés: en aquesta etapa es comparen els resultats obtinguts anteriorment amb la realitat. Normalment, quan l'error entre dues solucions consecutives és inferior a un 0,2% es considera un resultat vàlid i s'atura les iteracions.

---

<sup>19</sup> Discretització: reduir la peça en un conjunt d'elements definits per nodes

### 5.3. Disseny dels models

Com s'ha esmentat anteriorment, el vehicle a dissenyar és el Volkswagen NewBeetle del 2009. S'ha triat aquest model per dos motius: primer, pel disseny, és el rimer vehicle que em voldria comprar. Juntament amb això, el disseny del vehicle sembla fàcil degut a la simplicitat del vehicle. A més, és un cotxe molt arrodonit, amb corbes molt suaus, fet que evitarà possibles problemes a l'hora de mallar-lo amb el *Fluent*.

El disseny s'ha realitzat amb el software *Catia*, ja que la majoria d'empreses automobilístiques usen aquest software per al disseny dels seus productes.

Una de les parts més difícils per a començar el disseny dels vehicles ha estat trobar els plànols del cotxe. Les empreses intenten protegir els seus productes i resulta una tasca realment àrdua trobar les mides de cada superfície del vehicle per a poder dissenyar una còpia exacta. Per això, el que s'ha fet és aconseguir el que s'anomena *BluePrints*<sup>20</sup>, traslladar les quatre vistes disponibles a *Catia* i mitjançant l'eina Curve3D reproduir el model.

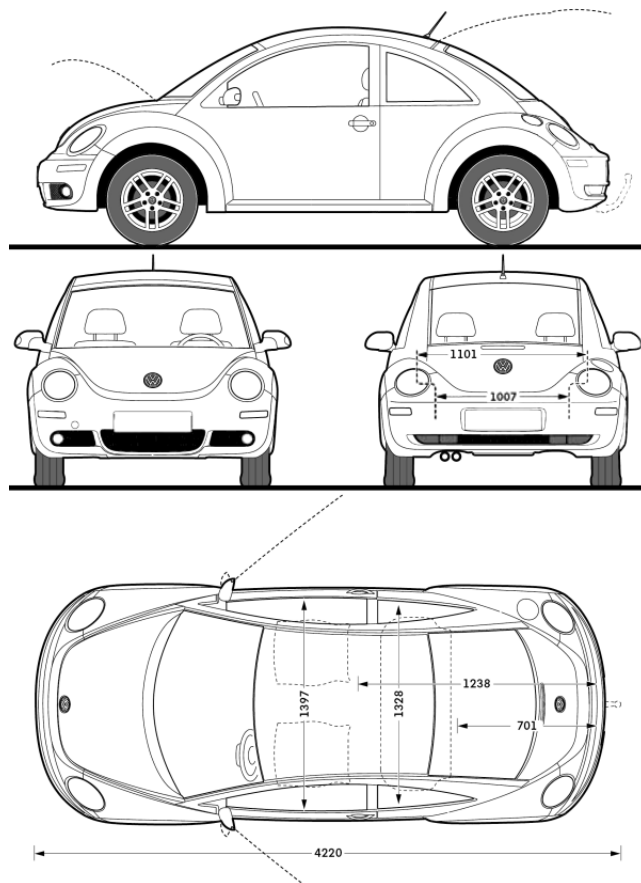


Fig.5.3.1.: Blueprints del Volkswagen NewBeetle del 2009 [8]

<sup>20</sup> BluePrint: Reproducció en paper d'un plànol d'enginyeria

Degut a la dificultat del disseny de miralls retrovisors, antena i detalls tals com la marca del vehicle a la part frontal d'aquest, s'ha decidit no dissenyar aquests elements, tot i que es creu que els retrovisors podem augmentar rellevantment el valor del  $C_D$  ja que no són elements dissenyats per a combatre l'aerodinàmica, sinó facilitar la conducció.

Amb les imatges col·locades a *Catia* es construeix la pell del primer vehicle capotat unint diferents corbes a l'espai, amb les referències dels blueprints. Un cop s'ha omplert de corbes 3D, el següent pas es omplir cada superfície delimitada per les esmentades corbes, com si fossin xapes unides per una recta. Per últim, com cal dissenyar també el vehicle descapotable i una extrusió en el vehicle anterior provocaria espais interns, cal crear un volum a partir de les xapes anteriors.

Amb tot això, els vehicles dissenyats es poden observar en la següent imatge:

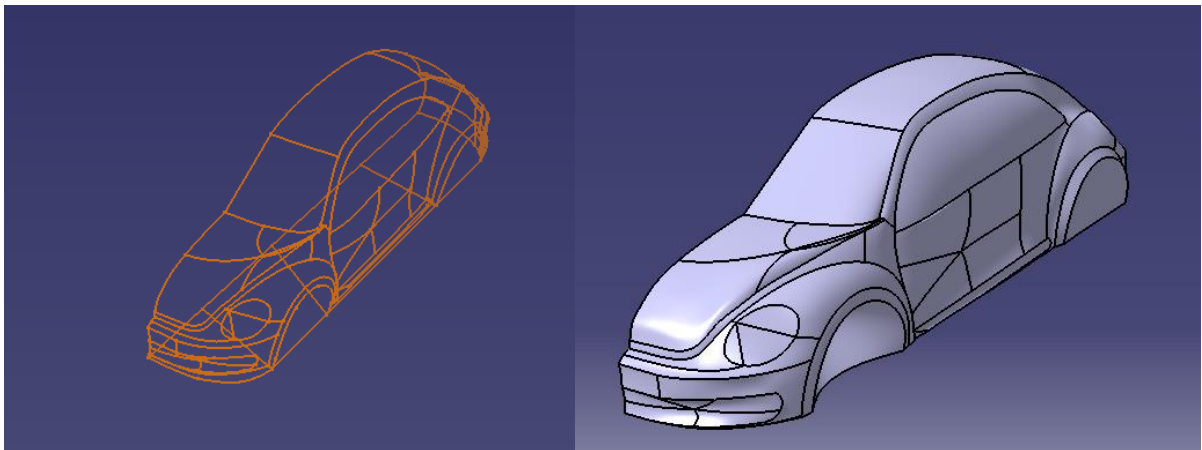


Fig.5.3.2.: Disseny mitjançant *Catia* del vehicle capotat

Com es pot observar, només s'ha dissenyat mig vehicle: la justificació de realitzar aquest fet és bàsicament el temps: s'usaran la meitat d'elements finits que no pas construint els vehicles sencers, fet que implica destinar la meitat de temps a l'hora de realitzar els càlculs. Apart, quan es realitzava una simetria dels cossos respecte al pla XZ, començaven a aparèixer problemes en el mallat del *Fluent* (espais buits, contactes puntuals,...) i no permetia començar les anàlisis.

Els problemes apareixen aquí: En primer lloc, quan es feia la simetria del mig vehicle per a completar-lo, restaven espais buits, en els quals l'aire s'hi podia filtrar. El que es va realitzar per a resoldre aquest problema fou primerament omplir el vehicle – passar d'un croquis 3D de superfícies a un volum – per a posteriorment realitzar la simetria. Així es va resoldre el problema que existia d'espais intermedis en croquis 3D.



Posteriorment, un cop importat a l'*Ansys*, sorgí una nova problemàtica, aquesta molt més greu: La intersecció de les rodes amb el xassís no produïa una intersecció de superfícies tangents, fet que l'*Ansys* es troba amb problemes a l'hora de mallar. Com es pot observar en la figura anterior, es va decidir tapar el xassís del vehicle simulant la tapa de la roda. Se sap que les rodes no estan dissenyades per a ser aerodinàmiques, i per tant és un aspecte que augmentaria el  $C_D$  del vehicle. Per tant, ja tenim dos elements no dissenyats que augmenten la resistència a l'avanç del vehicle.

Per últim, quan se selecciona la operació *FILL* en *Catia* per a omplir amb superfícies els croquis 3D prèviament dissenyats, el programa de disseny entén que cal omplir les corbes amb una superfície tangent a totes elles. No ha estat el cas de la roda davantera, ja que si s'observa novament la figura anterior, existeix una concavitat interior en el vehicle. Tot i dissenyar corbes intermèdies (com en el cas de la porta per evitar aquest fet) no ha estat possible fer entendre al programa que caldria disposar d'una superfície recta, tal i com succeeix en la roda posterior.

Un cop obtingut el disseny final dels vehicles el següent pas és guardar-los en format .igs per a poder importar aquestes dades a l'*Ansys*.

A l'obrir el *Workbench* del *Fluent* ens trobem amb 5 apartats: Geometry, Mesh, SetUp, Solution i Results. En aquest punt del projecte s'explicarà el que es va realitzar en el primer apartat: Geometry.

Un cop s'importa l'arxiu de format .igs al *Fluent* es va realitzar dos plans perpendiculars ubicats de la següent manera: El primer paral·lel al terra (o paral·lel a la part inferior del vehicle) a una distància de 0,3m, equivalent a la distància entre el xassís i el terra del vehicle. El segon pla s'ubica a la cara de la simetria del vehicle. El motiu de realitzar aquests plans servirà per a imposar-hi condicions de contorn i obtenir els resultats finals.

#### 5.4. Mallat

Un cop tenim els vehicles dissenyats, el proper pas per a continuar el projecte és el mallat dels elements. Cal recalcar que un bon mallat en un estudi CFD és bàsic per a obtenir resultats fiables, i el mallat es defineix amb els següents aspectes: la mida de l'element, l'existència o no de nodes intermedis<sup>21</sup> i la quantitat d'elements<sup>22</sup>. Aquestes tres presències determinen el temps d'anàlisi i la potència necessària per a arribar a una solució. Si es realitza un refinament de la malla – obtenir elements molt més petits, fet probable en zones crítiques del vehicle – el temps d'anàlisi augmenta de la mateixa manera que ho fa l'exactitud i la sensibilitat dels resultats. Si es tenen elements més grans, el temps d'anàlisi és inferior però poden aparèixer gradients de resultats entre elements consecutius, fet que indica uns resultats amb un error relatiu elevat.

Amb la teoria observada, és per això que s'ha optat per a dissenyar la meitat del vehicle com s'ha esmentat anteriorment, per a reduir a la meitat els elements i reduir el temps d'anàlisi. Cal mencionar que el procediment per ambdós vehicles fou el mateix, cal realitzar els mateixos passos per a obtenir la solució final.

El primer mallat dels vehicles es mostra a continuació:

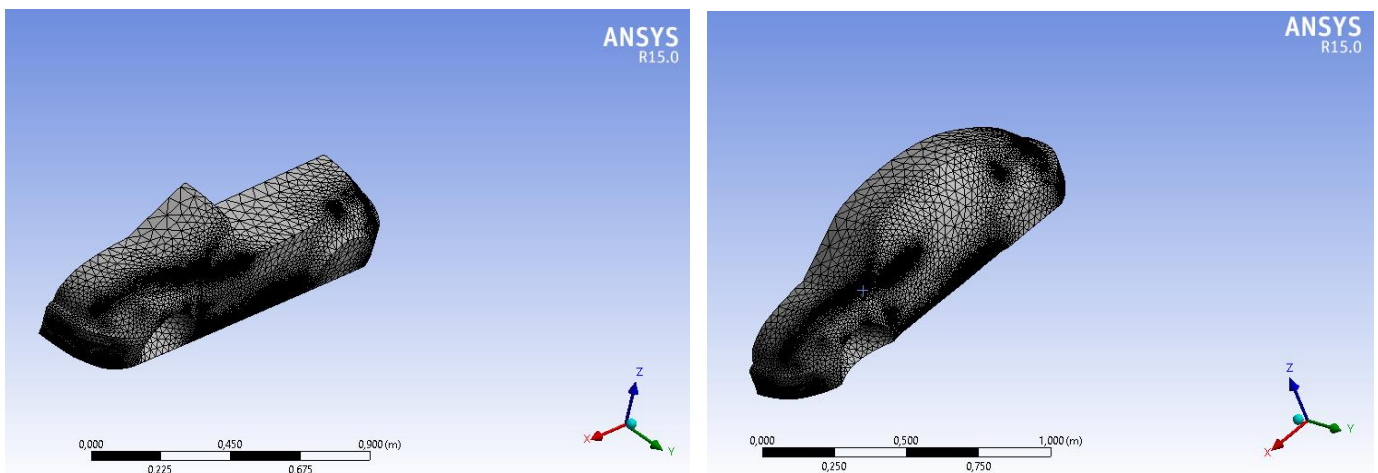


Fig.5.4.1.: Mallat estructural dels vehicles

---

<sup>21</sup> Nodes intermedis: Nodes situats enmig de les rectes d'unió de cada element. El resultat és més fiable però cal destinar un temps major

<sup>22</sup> Elements: Resultat de discretitzar i mallar un sòlid

Cal tenir en compte que no s'està realitzant un assaig estructural del vehicle: amb això es vol explicar que si es realitzés aquest anàlisi, en tindríem prou amb mallar els vehicles. Però l'anàlisi que es vol realitzar en aquest projecte és observar com deforma un flux d'aire a l'impactar sobre diverses superfícies, i per tant caldrà dissenyar un bloc sobre el mateix *Fluent* que englobi els vehicles i mallar-lo. Aquest bloc representa el volum de control del túnel de vent, i ha de tenir unes dimensions relativament grans per a observar els efectes de turbulència i vòrtex deixats a l'estela dels vehicles. Per a poder captar tota la transició de l'aire sobre el vehicle, des de la velocitat d'entrada perpendicular a la cara frontal del vehicle fins al fenomen de vòrtexs posteriors, s'ha creat un volum de control les dimensions del qual són 10 cops la dimensió del vehicle. S'ha ubicat de tal manera que s'ha deixat una longitud del vehicle per la part anterior d'aquest per captar l'aire d'entrada i 8 longituds del vehicle per la part posterior d'aquest per a observar com l'aire es desprèn del vehicle, quina trajectòria segueix i per on passen les línies de corrent. Amb això, s'obté un volum de control en el pla XZ del vehicle capotat i del pla YZ del vehicle descapotat de 10 vegades la longitud del vehicle. El gruix del volum de control<sup>23</sup> també serà de 3 vegades la secció transversal d'aquests, com també ho és l'alçada. Per tant, tenim un volum de control de les següents dimensions aproximadament: (15,2,3)m, on els 15 metres estan ubicats en la direcció X del vehicle capotat o Z del descapotat, els 2 metres estan ubicats en la direcció Y del vehicle capotat o X del descapotat i els 3 metres estan ubicats perpendiculars al terra.

A continuació es mostren els volums de control sobre cada vehicle i del mallat global:

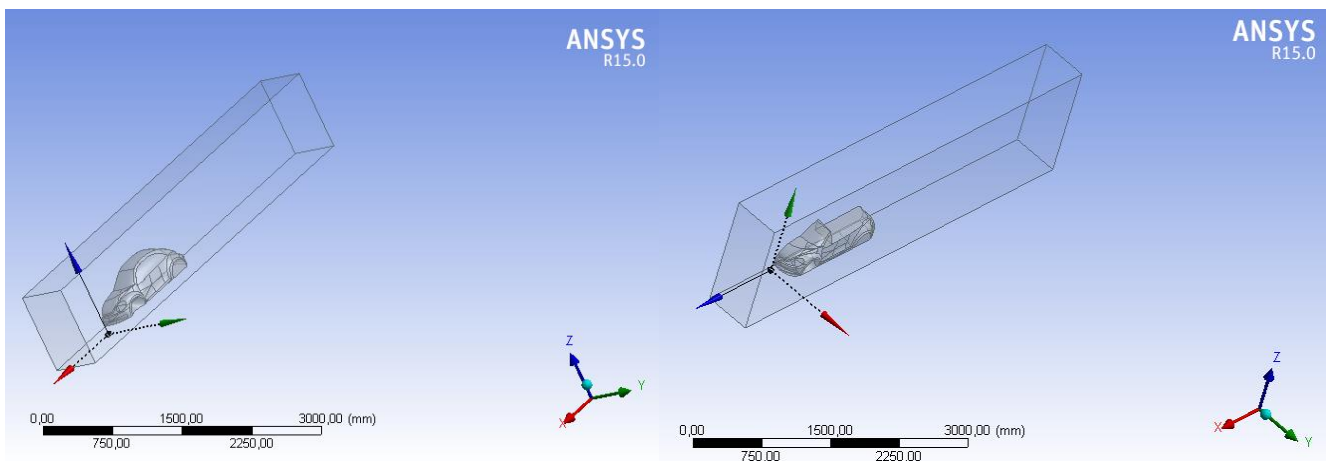


Fig5.4.2.: Volum de control de cada vehicle

<sup>23</sup> Volum de control: Recinte tancat, prisma que engloba tant el vehicle com l'aire que hi circularà.

El mallat global servirà per a iniciar els càlculs amb el software *Ansys*. A continuació es pot observar els mallats del volum de control:

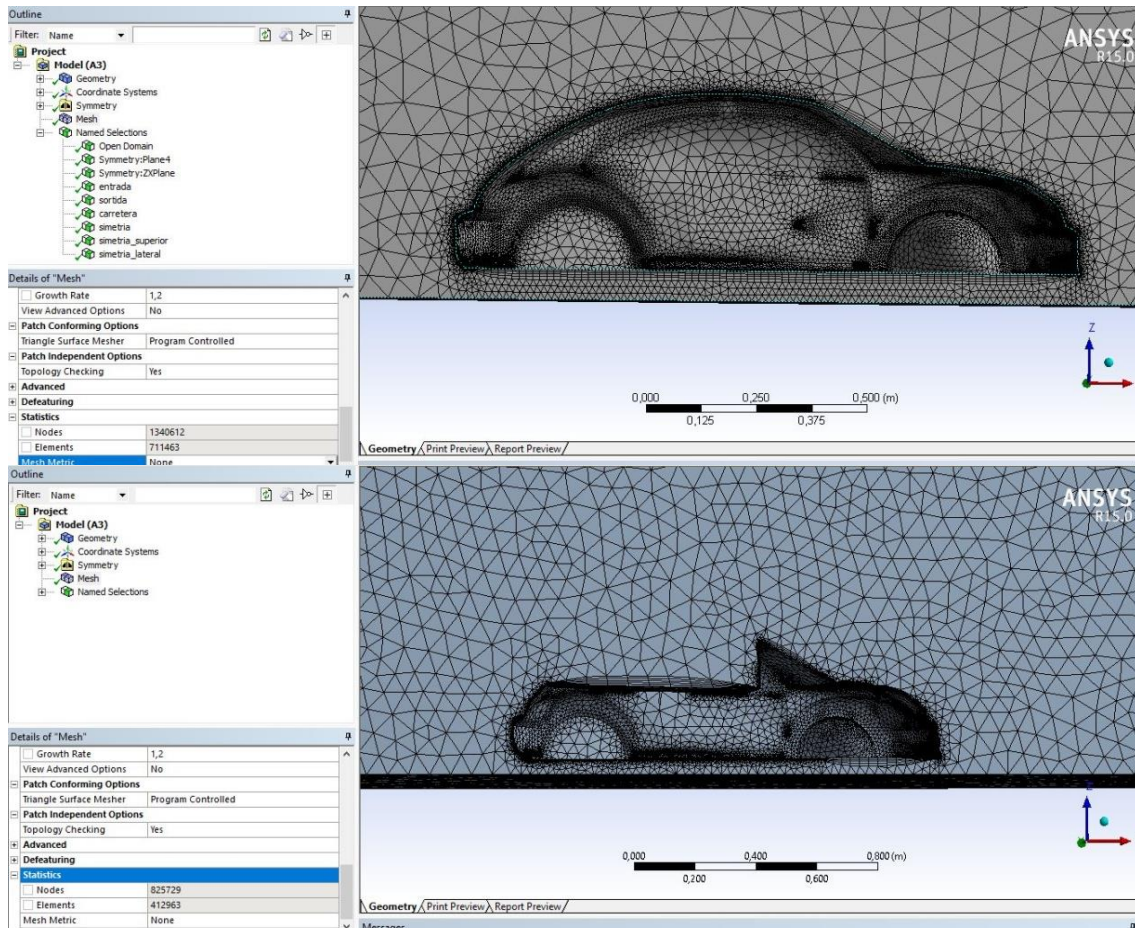


Fig.5.4.3.: Mallat dels vehicles juntament amb el volum de control

Com es pot observar, el vehicle capotat té més de 700.000 elements en el mallat, mentre que el descapotat, usant el mateix criteri de mallat, no arriba als 420.000 elements. Això és degut a què el vehicle capotat té major superfície de contacte amb l'aire i major volum de sòlid. Cal esmentar que s'ha realitzat un mallat molt fi a la superfície superior del vehicle capotat per a observar bé el desprendiment de la capa límit, que se suposa en una primera hipòtesi que aquest fet succeirà en la zona esmentada. Aquest mallat s'ha realitzat també al vehicle descapotat, però sense aprofundir tant, ja que es creu que l'aire, a l'impactar sobre el parabrises anterior, sortirà rebutjat cap a fora i no tornarà a impactar sobre la superfície del vehicle. Aquesta hipòtesi es corroborarà als resultats.

Per acabar, no s'ha realitzat un segon volum de control més proper al vehicle amb un refinat de malla ja que es creu que augmentaria molt els elements de l'estudi i donaria valors molt propers, però en canvi, com es pot observar en la figura anterior, s'ha realitzat el que es coneix com a *Inflation*. Aquest estudi es basa en realitzar un mallat uniforme al voltant d'una corba, el qual servirà per a observar amb deteniment el desprendiment de la capa límit i els esforços viscosos que es generen sobre la mateixa. En el vehicle capotat la inflation ha sortit homogènia per la part superior i inferior del vehicle, però en el descapotat ha fet una inflation corba sobre una superfície recta.

### 5.5. Condicions de contorn

Per a poder simular correctament el corrent de l'aire sobre el sòlid, cal definir prèviament unes condicions de contorn que el programa de simulació necessita per no tenir graus de llibertat en el sistema. La superfície per on entra l'aire, paral·lela a l'àrea frontal d'impacte del fluid A, serà anomenada *velocitat* i és on es definirà la velocitat d'entrada del flux d'aire. La superfície posterior per on surt l'aire serà anomenada *pressió*, ja que el *Fluent* necessita una pressió de referència per on sortirà el fluid. La superfície per on circula el vehicle s'ha anomenat *terra*, i la resta de superfícies s'han anomenat *simetria* - lateral, superior i simetria del vehicle.

Posant valors a les condicions de contorn, ens trobem amb les següents situacions:

- I. L'aire entra al sistema volum de control per la superfície *velocitat* amb una velocitat de l'aire  $U$  igual a 22,22m/s, o el que és el mateix, 80km/h, per a simular que els vehicles circulen a la màxima velocitat permesa per les Rondes de Barcelona. A més, com és zona de flux lliure<sup>24</sup>, s'aplica un 1% d'intensitat de turbulència<sup>25</sup>.
- II. L'aire surt del sistema volum de control per la superfície *pressió* amb una pressió de 0 Pa. Com s'ha esmentat anteriorment, cal donar un valor de pressió relativa de referència per a inicialitzar els càlculs amb el *Fluent* - la pressió absoluta serà la pressió atmosfèrica, ja que ens trobem a l'aire lliure. A més, com el flux d'aire és funció de la turbulència provocada pels vehicles, cal un valor de turbulència superior a l'inicial. Doncs, s'aplica un 5% d'intensitat de turbulència.
- III. L'efecte viscos del flux d'aire s'ha de tenir en compte en les superfícies dels vehicles i del *terra*, ja que es consideren *parets*. La superfície del vehicle és estàtica, és a dir, el vehicle no es mou, qui ho fa és l'aire amb una velocitat en la mateixa direcció, sentit contrari i amb la velocitat del vehicle, i aquesta velocitat s'ha imposat a la superfície *terra*.

- IV. Per a les superfícies de *simetria*, valgui la redundància, s'ha aplicat les condicions de contorn de simetria, ja que aquestes superfícies son alienes a l'estudi del flux d'aire i no caldrà que siguin estudiades per la viscositat del flux d'aire.

---

<sup>24</sup> Flux Lliure: El fluid flueix únicament per l'acció de la gravetat

<sup>25</sup> Turbulència: Les partícules d'un fluid no segueixen trajectòries lineals, sinó que formen vòrtexs

## 5.6. Càlcul de la solució

Primer de tot caldrà saber si el flux d'aire que tenim és un flux compressible o no. Per defecte, l'aire es considera un flux incompressible, però el càlcul del nombre de Mach resol aquest dubte. El nombre adimensional de Mach es troba dividint la velocitat del flux de l'aire aplicat respecte la velocitat del so en el fluid esmentat:

$$Ma = \frac{U}{a} = \frac{22,22 \text{ m/s}}{340,3 \text{ m/s}} = 0,066, \text{ on:}$$

U = Velocitat del fluid

A = Velocitat del so en el medi del mateix fluid, en aquest cas, aire

Recordem que el nombre de Mach separa el tipus de fluid segons els següents valors:

- I.  $Ma < 0.3$ : Fluid pràcticament incompressible, en qualsevol part del flux. Les variacions de densitat degudes al canvi de pressió poden ser negligibles.
- II.  $Ma > 0.3$ : Fluid subsònic.
- III.  $0.8 < Ma < 1.2$ : Fluid transònic, regions de fluid subsònic i supersònic.
- IV.  $1.2 < Ma < 5$ : Fluid supersònic.
- V.  $Ma > 5$ : Fluid hipersònic, fluxos tan elevats que provoquen dissociacions de molècules del fluid.

Amb el valor de Ma obtingut, ens trobem en el cas de fluid incompressible, fet que suposa una disminució de la dificultat en els càlculs a realitzar. El model de turbulència que s'imposa al *Fluent* és el  $k-\epsilon^{26}$ , ja que és el més comú en usar en CFD per a simular fluxos turbulents i a més és el més usat en l'àmbit de l'enginyeria, tot i que presenta algun problema de modelat de flux amb separació de capa límit. Per últim, l'estudi esmentat presenta una bona relació entre l'esforç a realitzar en el càlcul numèric i la validesa dels valors obtinguts. Aquest model consta de dues equacions:

- I. Energia Cinètica Turbulenta - KTE -  $k$ : determina l'energia cinètica de l'efecte de la turbulència.
- II. Dissipació Turbulenta -  $\epsilon$ : determina la proporció de la dissipació de la KTE.

---

<sup>26</sup>  $k-\epsilon$ : Model de turbulència que incorpora dues equacions en derivades parcials on es relaciona la KTE amb la velocitat de dissipació

Els problemes de modelat de flux amb separació de la capa límit se solventen de la següent manera: dins del model  $k-\epsilon$  s'escull la opció *realizable*, fet que aproxima els resultats amb un error relatiu menor al 5%. S'usa aquesta opció ja que els tutorials de *Fluent* recomanen marcar-la.

A continuació s'aplica la condició de no equilibri en la paret, ja que proporciona resultats més precisos pel que fa a la separació de la capa límit turbulenta sense augmentar el temps d'anàlisi.

Per començar els anàlisis ha calgut introduir primerament l'àrea frontal  $A^{27}$  dels vehicles i la densitat  $\rho^{28}$  dels fluids. Per defecte, aquest últim valor està predefinit al programa *Ansys* amb un valor  $\rho = 1.225 \frac{Kg}{m^3}$ , i l'àrea frontal s'ha aproximat a un valor  $A = 0,22103m^3$ . Aquest valor és l'àrea frontal del vehicle, però no és el valor que cal introduir al *Fluent*. El valor de l'àrea frontal real és el de l'àrea frontal projectada,  $A_p$ , el valor del qual és de  $0,1102m^3$ .

Posteriorment, s'ha usat la opció *FirstOrderUpwind*<sup>29</sup> proporcionada pel *Fluent* per a facilitar la convergència de la solució. Les primeres 100 iteracions són menys precises però convergeixen ràpidament. Les següents 500 iteracions s'han realitzat amb la opció *SecondOrderUpwind*<sup>30</sup>, més precisa que la primera, però no convergeix fàcilment. Amb aquestes dues opcions s'aconsegueix obtenir una solució propera a la realitat - començant per uns càlculs poc certers que convergeixen ràpidament i continuant amb uns càlculs més òptims a la realitat - i evitar la oscil·lació que es produeix a l'inici dels càlculs. Es pot observar en les següents imatges el canvi brusc que es produeix en la iteració 101, canvi entre les opcions *FirstOrderUpwind* i *SecondOrderUpwind*. A continuació, es mostra el gràfic de residuals d'ambdós vehicles en funció de les iteracions:

---

<sup>27</sup> A: Àrea frontal d'impacte del fluid sobre el vehicle

<sup>28</sup>  $\rho$ : Densitat del fluid aire

<sup>29</sup> *FirstOrderUpwind*:

<sup>30</sup> *SecondOrderUpwind*:



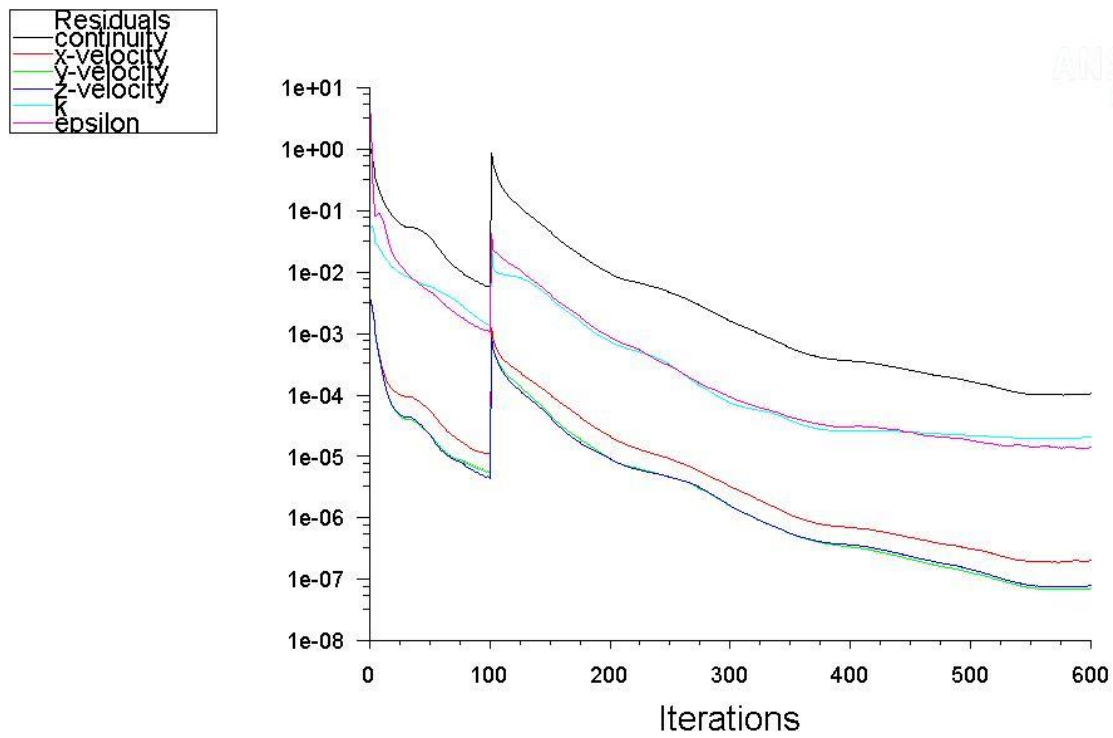


Fig.5.6.1.: Representació dels residuals del vehicle capotat

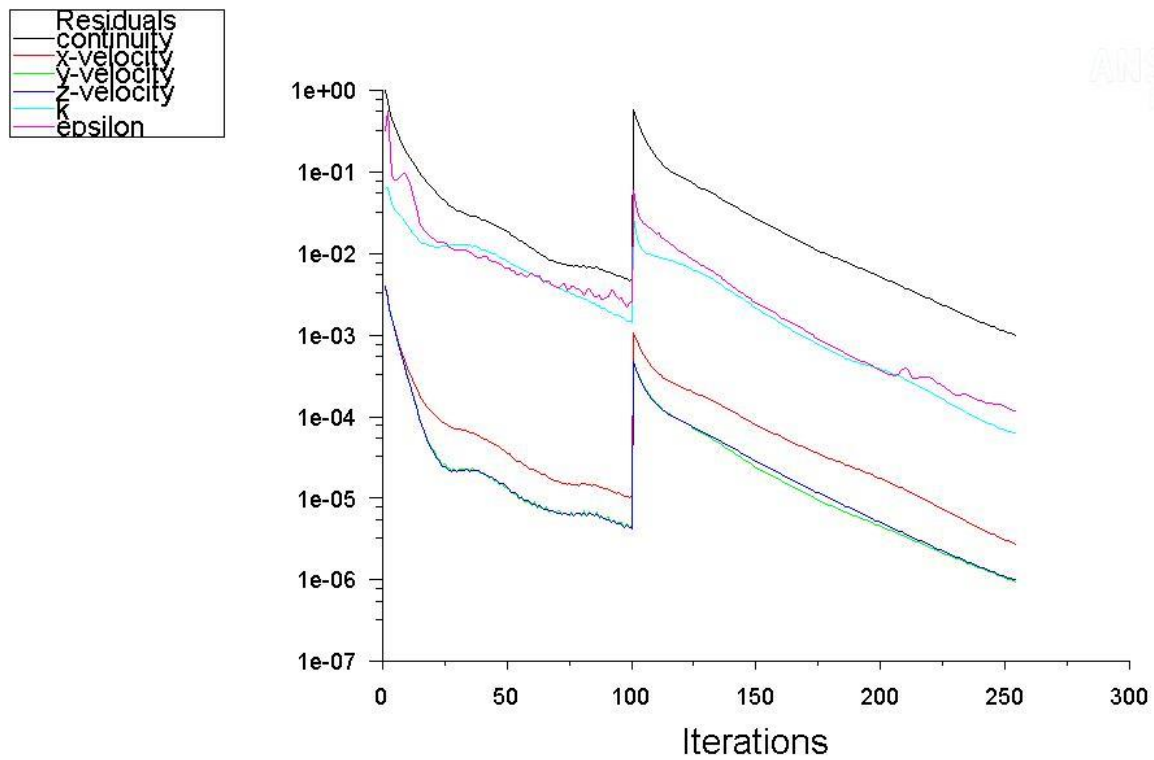


Fig.5.6.2.: Representació dels residuals del vehicle descapotat

## 6. Resultats i Interpretació

En aquest punt del projecte s'analitzaran els resultats obtinguts, mitjançant el càlcul de  $F_D$ ,  $F_L$  i  $M$  que pateixen els vehicles, juntament amb els coeficients aerodinàmics. A més, es mostraran les línees de corrent i trajectòria del flux d'aire sobre cada superfície dels vehicles i les pressions que pateixen per a comprendre l'efecte de la turbulència sobre aquests.

### 6.1. $C_D$ , $C_L$ i $M$ . $F_D$ i $F_L$

Un cop obtinguts aquests valors, es realitzarà el càlcul de la eficiència  $\varepsilon$ , que es defineix com relació entre  $C_L$  i  $C_D$ , per a valorar l'aerodinàmica global de cada cotxe. Per a reduir el consum de combustible, cal que el *drag* sigui el mínim possible, i mantenint un nivell elevat d'eficiència  $\varepsilon$ , caldrà que el *lift* sigui igualment baix.

La eficiència  $\varepsilon$  es defineix com la relació entre el  $C_D$  i el  $C_L$ . És un bon indicador per a trobar el funcionament global aerodinàmic del vehicle. Un valor elevat d'eficiència s'obté amb una relació gairebé 1:1 entre el *drag* i el *lift*. Cal recordar, però, que l'objectiu a l'hora de dissenyar un vehicle és reduir el coeficient de resistència a l'avanç  $C_D$  i, per tant, caldrà també reduir el  $C_L$  per provocar un valor proper a 1 de l'eficiència.

Per a poder calcular el moment de capcineig  $M$  cal primerament trobar el centre de masses i el centre de pressions dels vehicles: gràcies al software *Catia* es pot trobar ràpidament el centre de masses, i el *Fluent* és l'encarregat de trobar el centre de pressions. A continuació es pot observar la ubicació d'ambdós valors:

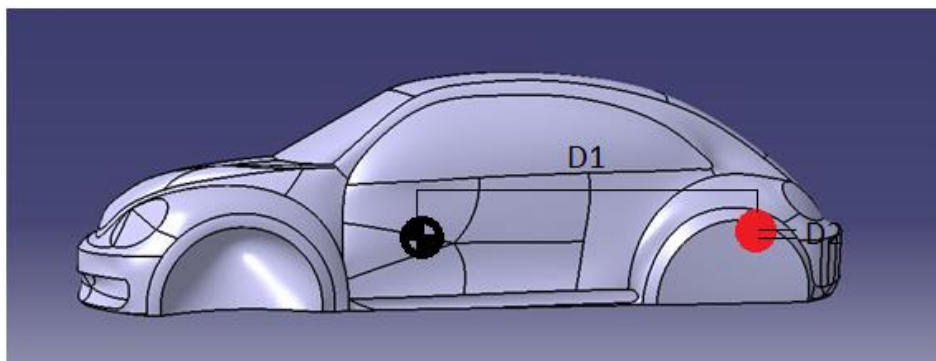


Fig.6.1.1.: Centre de masses, en negre, i centre de pressions, en vermell, del vehicle capotat

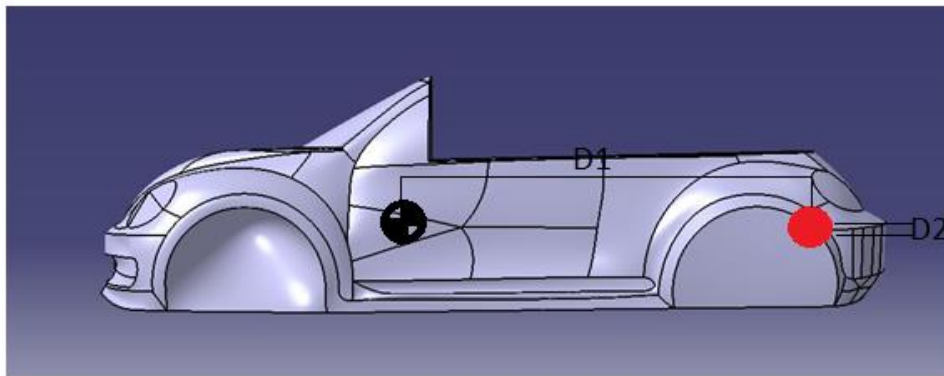


Fig.6.1.2.: Centre de masses, en negre, i centre de pressions, en vermell, del vehicle descapotat

Un cop trobats els valors dels centres de masses i pressions, es procedeix al procés de càlcul de  $C_D$ ,  $C_L$  i  $M$  d'ambdós vehicles. Seguint el procediment esmentat anteriorment, els gràfics de cada vehicle es mostren a continuació:

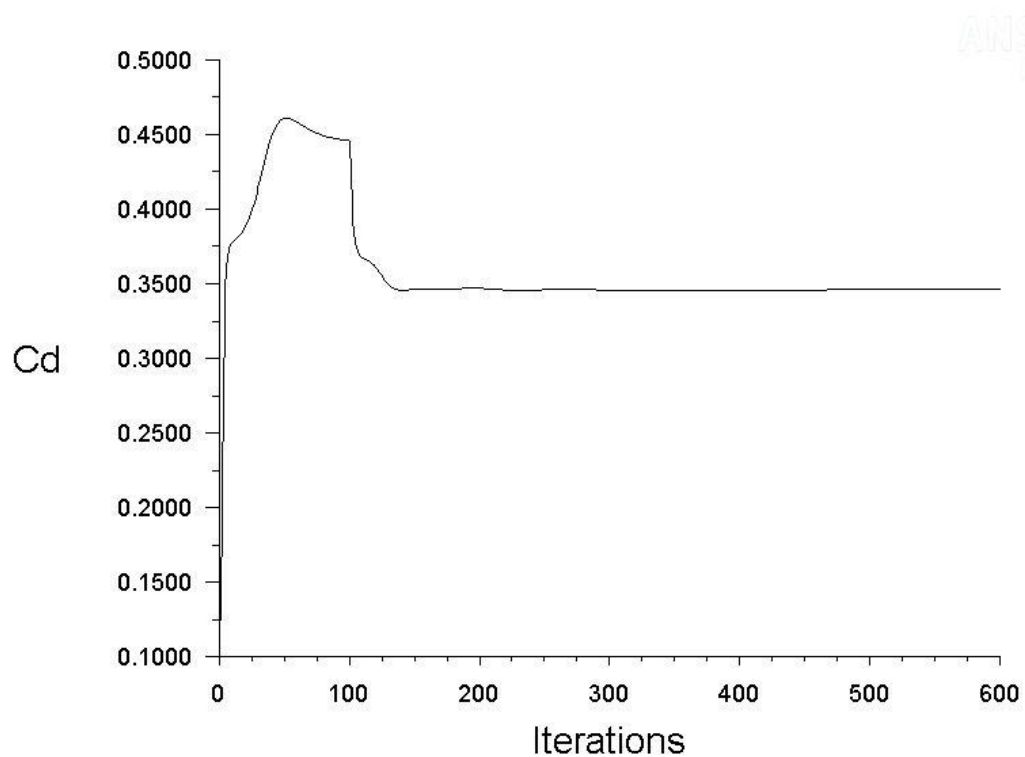


Fig.6.1.3.:  $C_D$  del vehicle capotat

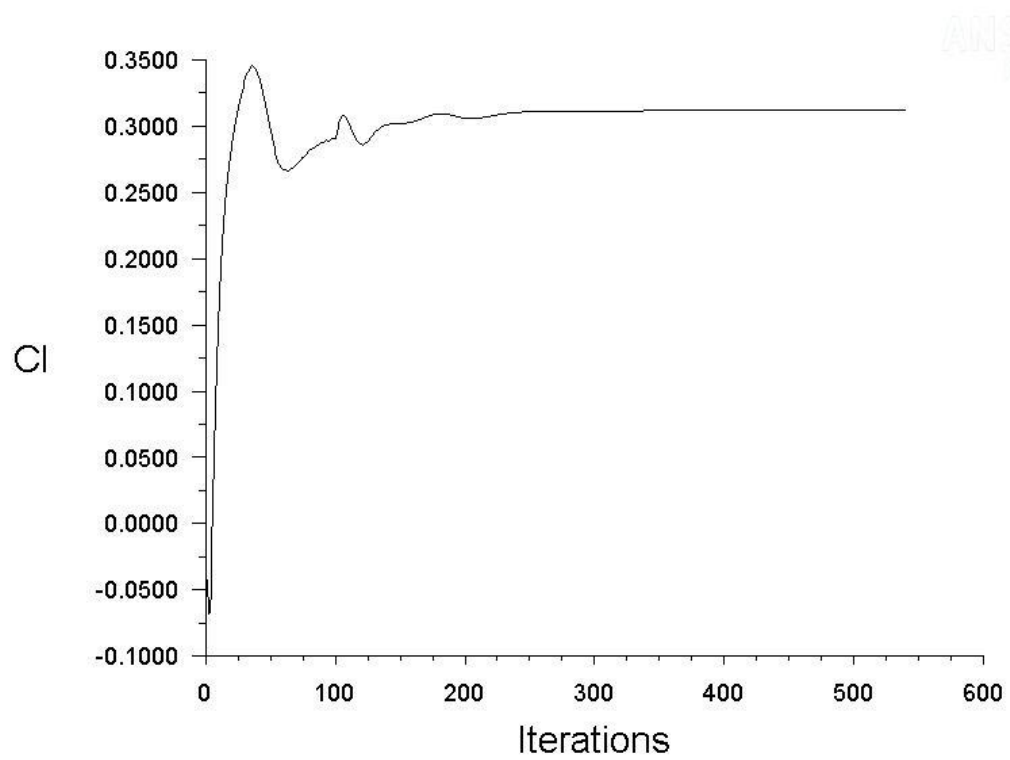


Fig.6.1.4.:  $C_l$  del vehicle capotat

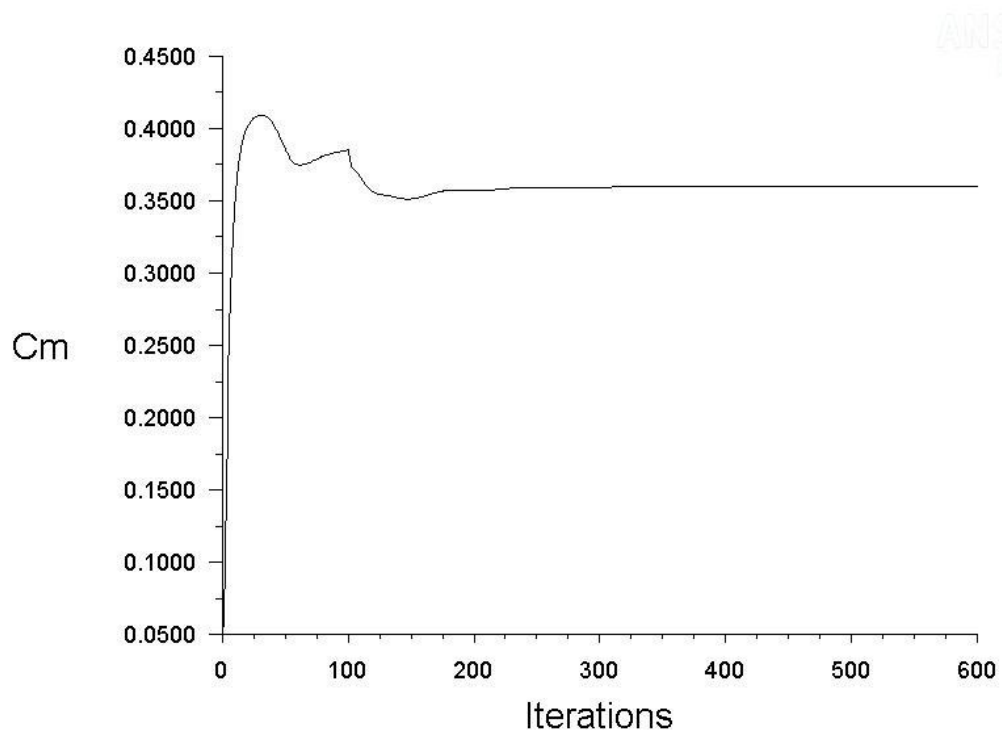


Fig.6.1.5.:  $C_m$  del vehicle capotat

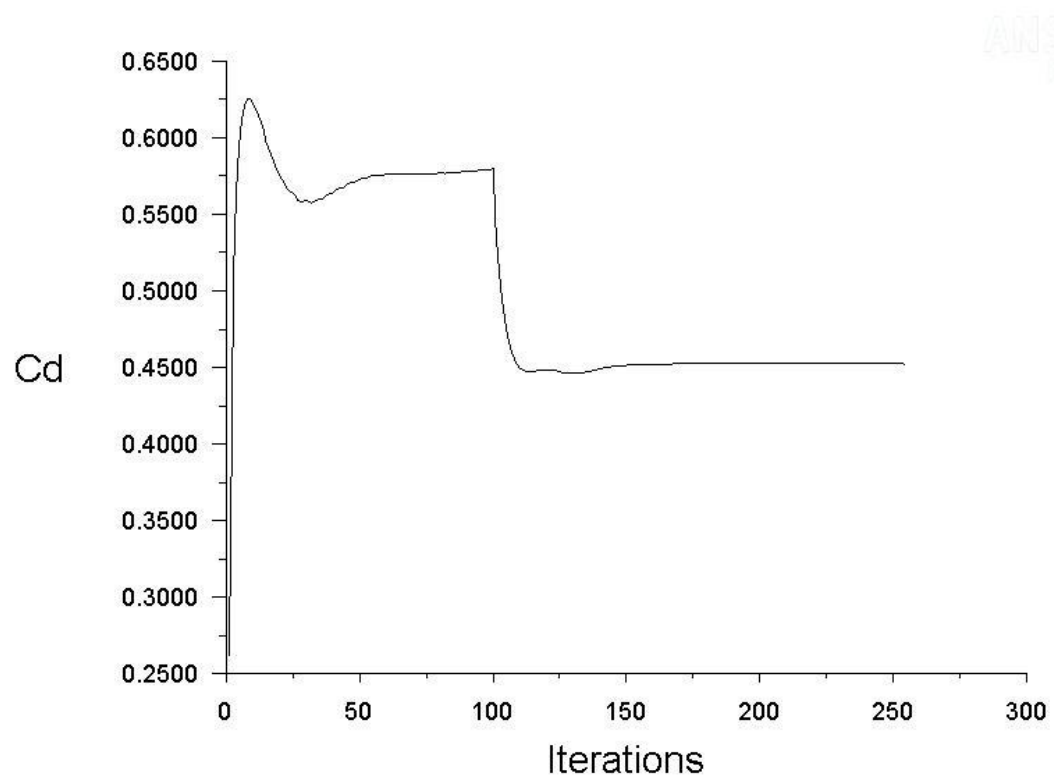


Fig.6.1.6.:  $C_D$  del vehicle descapotable

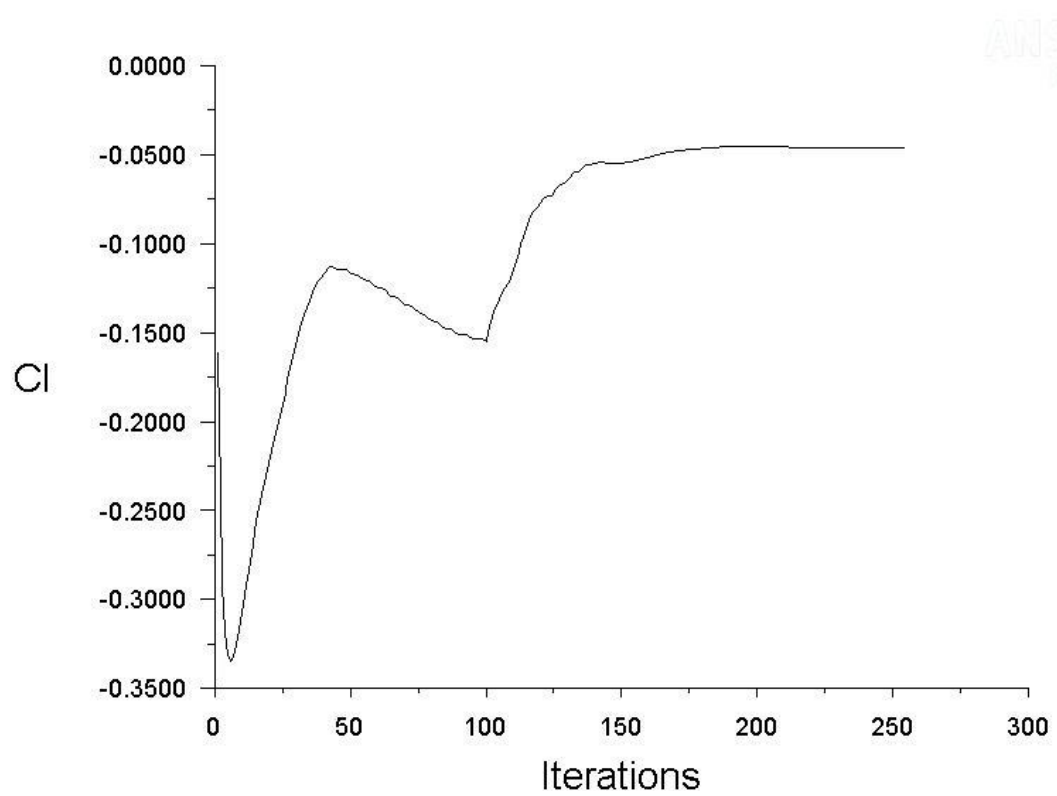


Fig.6.1.7.:  $C_L$  del vehicle descapotable

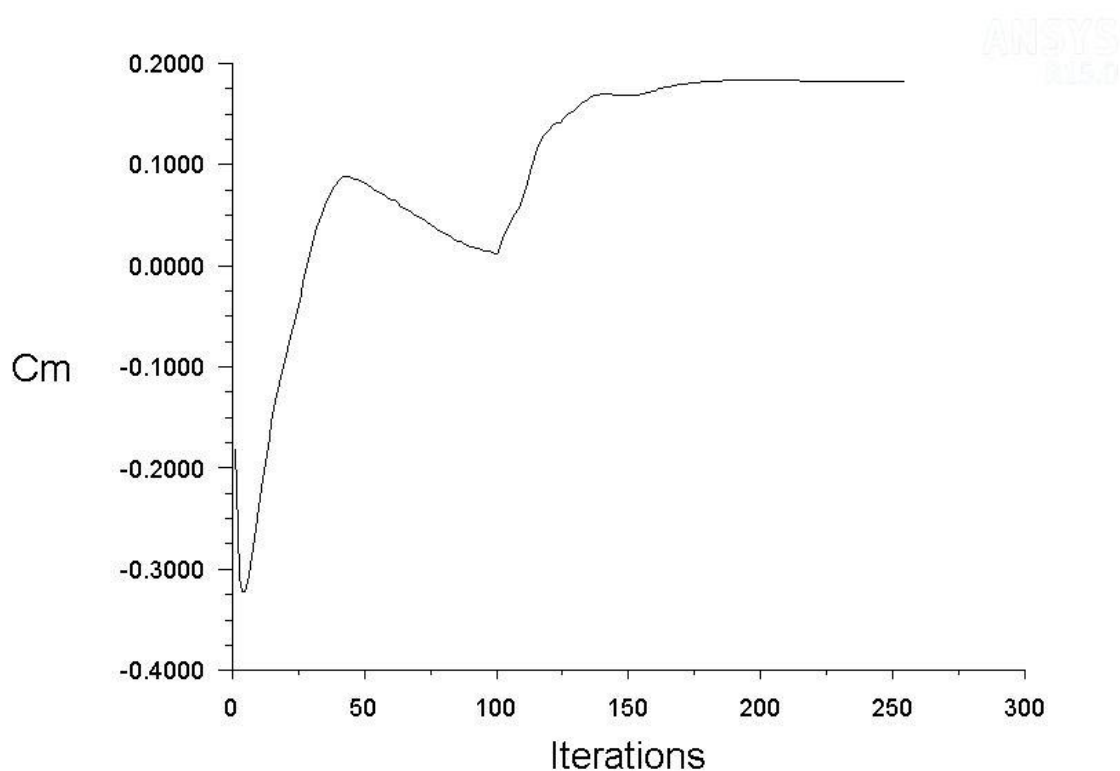


Fig.6.1.8.:  $C_M$  del vehicle descapotable

És interessant destacar els gràfics del vehicle descapotable: tant el *Lift* com el moment de capcineig comencen les iteracions d'una manera molt poc normal, però un cop es passa a la opció *SecondOrderUpwind* els valors s'estabilitzen.

En la següent taula es pot observar els valors anteriorment esmentats per a cada vehicle:

	VEHICLE CAPOTAT	VEHICLE DESCAPOT.
<b>Centre de masses</b>	(-0.75, 0, 0.241)	(-0.735, 0, 0.22)
<b>Centre de pressions</b>	(0.733, 0, 0.248)	(0.64, 0, 0.204)
<b><math>C_D</math></b>	0.3460	0.45231
<b><math>C_L</math></b>	0.31194	-0.04657
<b><math>C_M</math></b>	0.35975	0.18158
<b><math>F_D</math></b>	11.5167N	15.3936N
<b><math>F_L</math></b>	15.449N	-1.76517N
<b><math>M</math></b>	13.3843N·m	8.7583N·m
<b><math>\epsilon</math></b>	0.9015	-0.1029

Taula 6.1.1.: Resultats anàlisis vehicles

Els valors obtinguts en el vehicle capotat semblen correctes, amb una relació gairebé 1:1 entre  $C_D$  i  $C_L$ , i amb unes forces aerodinàmiques de valor semblant. En canvi, el vehicle descapotat dóna uns valors un tant estranys, amb un  $C_L$  i *Lift* negatius, fet que pot indicar que el vehicle té major adherència sobre la carretera, però pitjor coeficient de resistència a l'avanç que el capotat.

Amb les figures anteriors es pot trobar el moment de capcineig  $M$  mitjançant la següent expressió del moment cinètic entorn un punt:

$$\Sigma M (G) = 0$$

$$\Sigma M (G) = -F_L \cdot D_1 - F_D \cdot D_2 - M ; \text{ on}$$

$D_1$  és la distancia horitzontal entre centre de masses i centre de pressions.

$D_2$  és la distancia vertical entre centre de masses i centre de pressions.

Resolent aquestes dues equacions i substituint els valors de les distàncies, s'obté el moment de capcineig  $M$  per a cada vehicle:

$$M_1 = 0,3625$$

$$M_2 = 0,1925$$

A continuació es calcula el valor de l'error relatiu entre el moment de capcineig  $M$  obtingut al software *Fluent* per a cada vehicle i l'obtingut analíticament:

$$\%error_{capotat} = \frac{M_{fluent} - M_1}{M_1} = -0.76\%$$

$$\%error_{descapotable} = \frac{M_{fluent} - M_2}{M_2} = -5.67\%$$

## 6.2. Pressions

A les següents imatges es pot observar l'efecte de la pressió sobre els vehicles: Com era d'esperar, se centra bàsicament en el para-xocs davanter, ja que la superfície és ortogonal al flux d'aire. Aquesta zona, marcada en vermell, indica zones d'estancament: l'aire en aquesta zona té velocitat molt baixa i una pressió molt elevada, tot al contrari que a la resta de la pell dels vehicles. Segurament, tant la part davantera de les rodes i dels retrovisors tindrien una gran zona d'estancament.

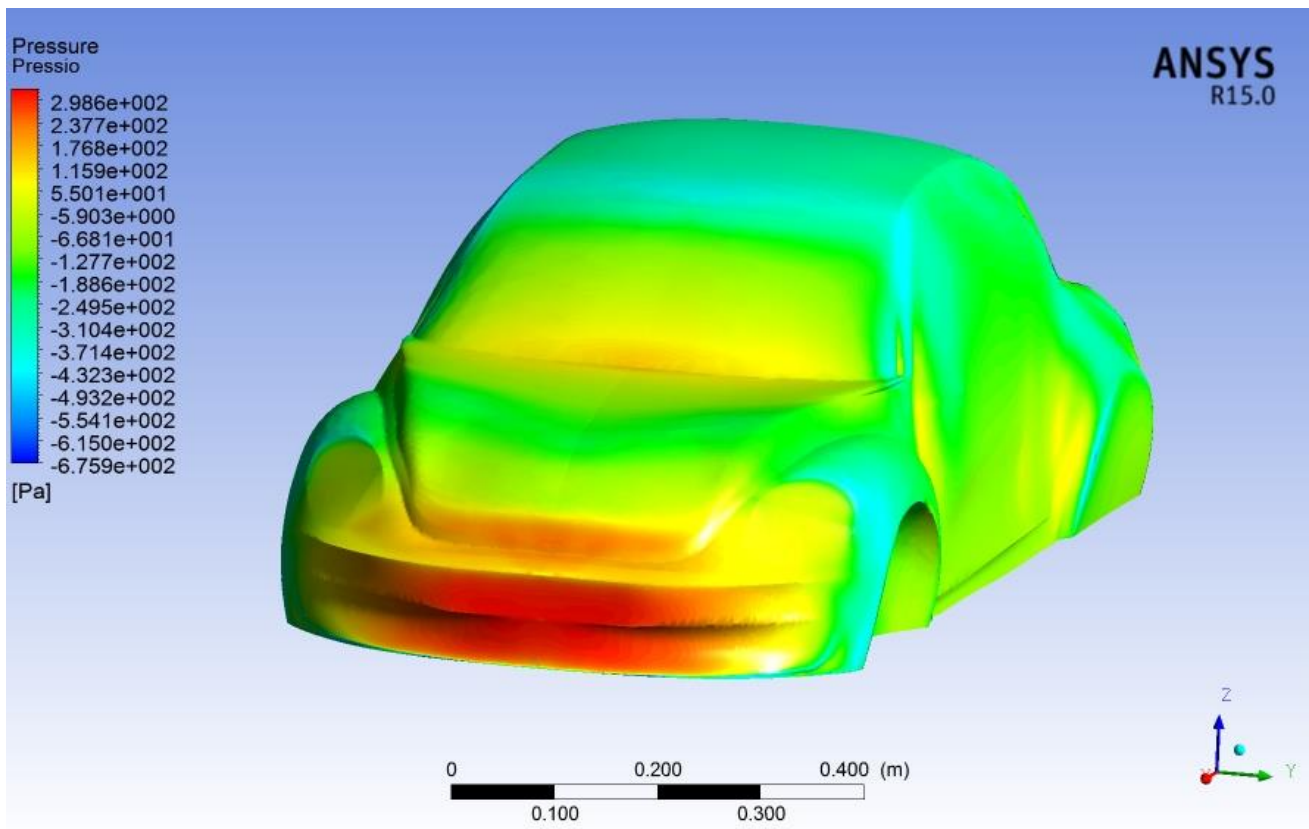


Fig.6.2.1.: Pressions part anterior del vehicle capotat



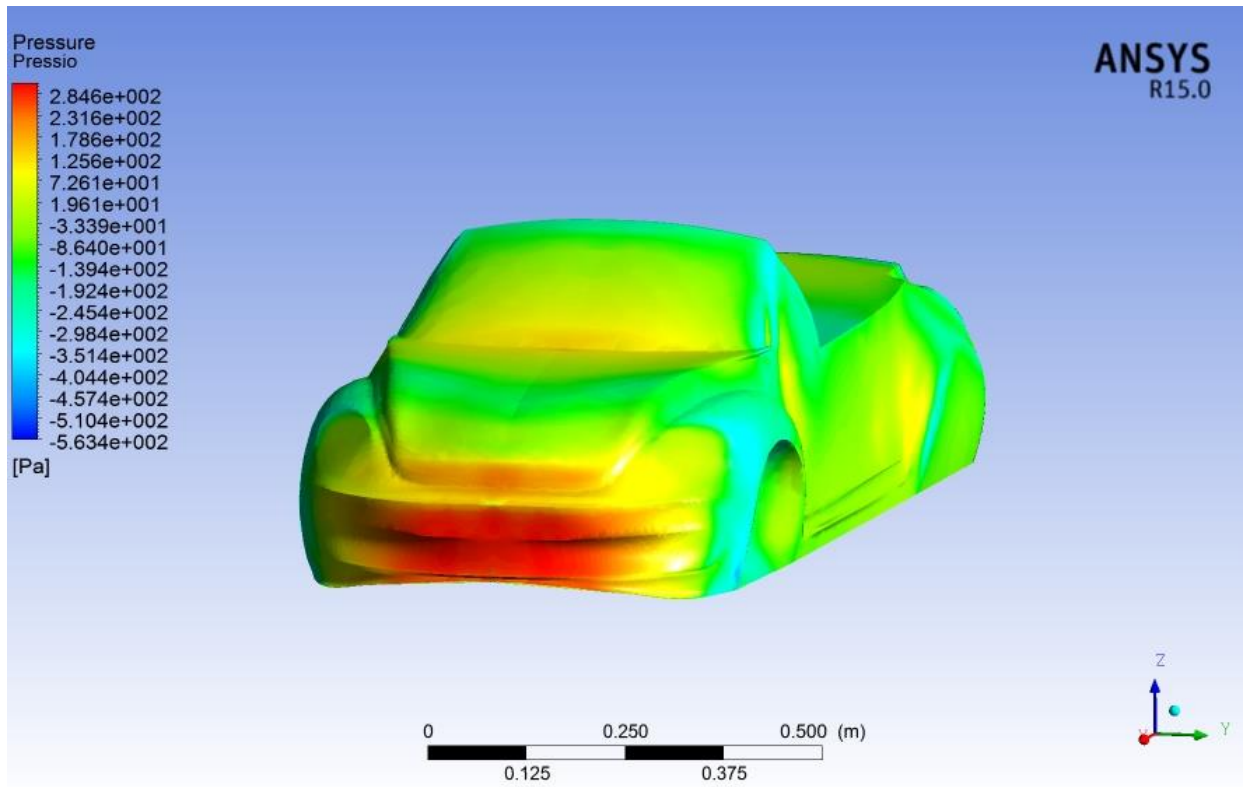


Fig.6.2.2.: Pressions part anterior del vehicle descapotat

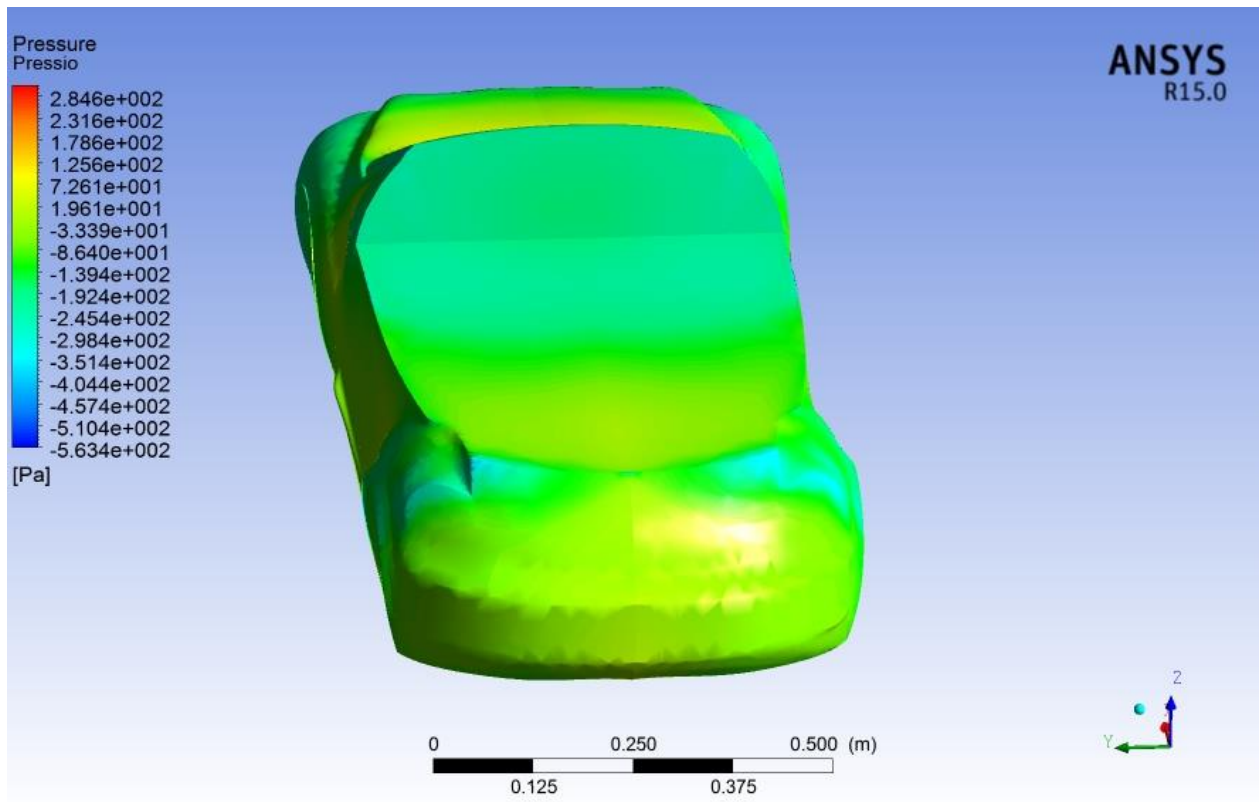


Fig.6.2.3.: Pressions part posterior del vehicle descapotat

Per contra, les zones blaves corresponen a depressions de l'aire, fet contrari a la zona d'estancament, és a dir, velocitat elevada i pressió molt baixa. És en aquestes zones on caldrà prestar atenció ja que és on pot aparèixer la separació de la capa límit i la consecució de turbulències.

Per a validar els resultats com s'ha realitzat en el cas de les forces aerodinàmiques, es procedirà a calcular la pressió en un punt del para-xocs davanter mitjançant el *principi de Bernoulli* entre la superfície definida al *Fluent* com a superfície velocitat i el propi para-xocs:

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{U^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{v_B^2}{2g}$$

on:

$P_A = 0 \text{ Pa}$ , per condicions de contorn

$P_B$  = pressió puntual para-xocs davanter

$\gamma = \rho \cdot g$

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$Z_A = Z_B = 0$

$U$  = velocitat del fluid (en m/s) = 22,22 m/s

$v_B$  = velocitat del para-xocs davanter = 0 m/s

Simplificant l'equació anterior i aïllant el valor de  $P_B$  s'obté:

$$P_B = \frac{U^2 \cdot \gamma}{2g} = \frac{U^2 \cdot \rho}{2} = 302.47 \text{ Pa}$$

Aquesta expressió del Bernoulli és només vàlida per a fluids sense frecs, fet que no correspon amb l'estudi dissenyat. Tot i això, es realitza un Bernoulli per a trobar una aproximació. En aquest cas, no cal trobar error relatiu entre les dades de l'*Ansys* i els valors teòrics obtinguts.

### 6.3. Velocitats

Paral·lelament a l'efecte de la pressió apareix la velocitat del fluid, aspecte fonamental en l'estudi de CFD. Per a observar l'estela que deixa rere sí cada vehicle cal observar la velocitat del fluid a l'impactar sobre les superfícies d'aquests, quina estela deixa i a partir de quin punt se separa de la pell de cada cotxe. En les següents imatges es poden observar les línies de corrent com s'ha esmentat anteriorment per a veure per on flueix la corrent d'aire. L'aire vé de la superfície *velocitat* definida al *Fluent* a la velocitat per defecte de 80km/h o 22,22m/s fins que impacta sobre la superfície del vehicle, concretament contra el para-xocs davanter. Posteriorment, l'aire flueix per la geometria del vehicle i al final es desprèn d'aquest. Pel que fa al vehicle capotat, l'aire ressegueix completament la geometria del vehicle fins que surt per la part posterior d'aquest. En aquest punt és on es generen els vòrtexs, que són fluxos turbulents d'aire amb trajectòries de corrent tancades. Pel que fa el vehicle descapotat, l'aire es desprèn a partir del para-brises davanter. En les següents imatges es pot observar aquests fenòmens en ambdós vehicles:

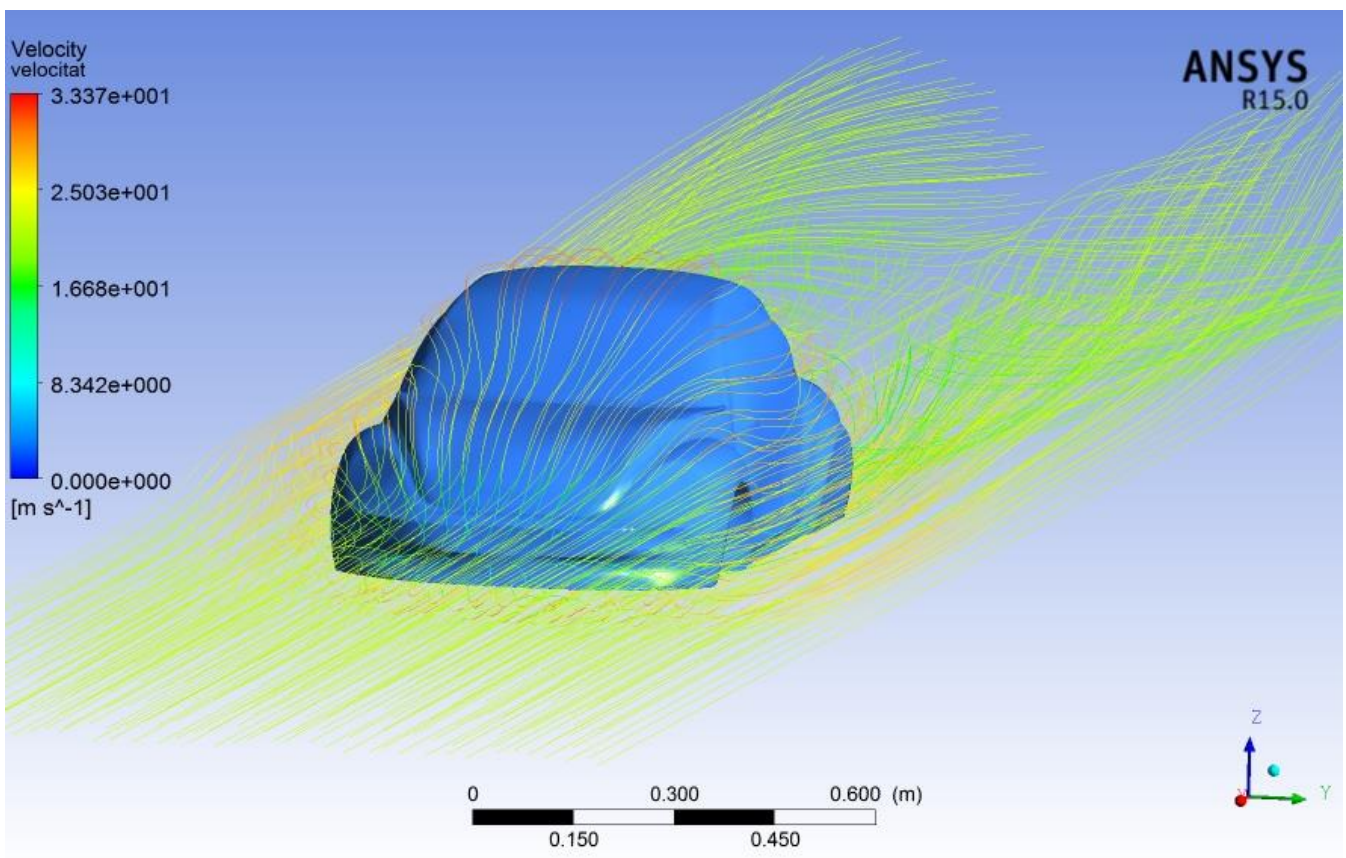


Fig.6.3.1.: Camp de velocitats sobre el vehicle capotat

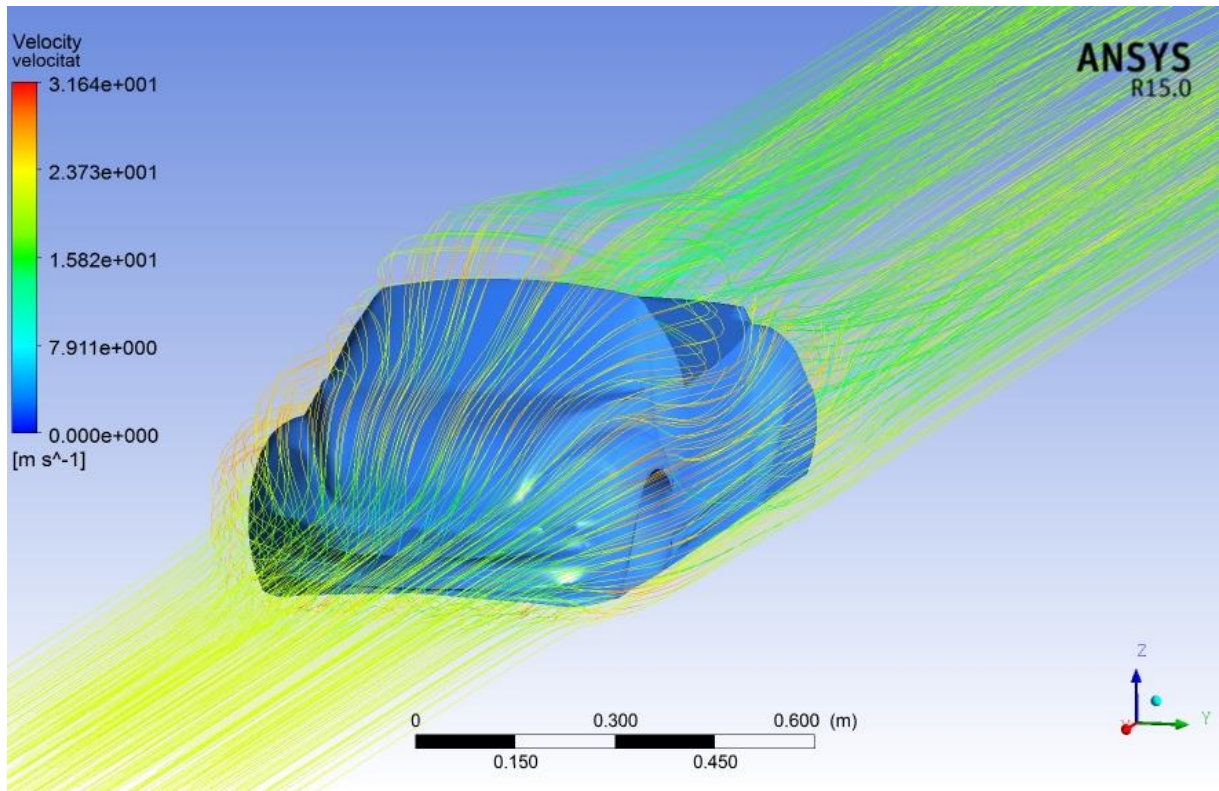


Fig.6.3.2.: Camp de velocitats sobre el vehicle descapotat

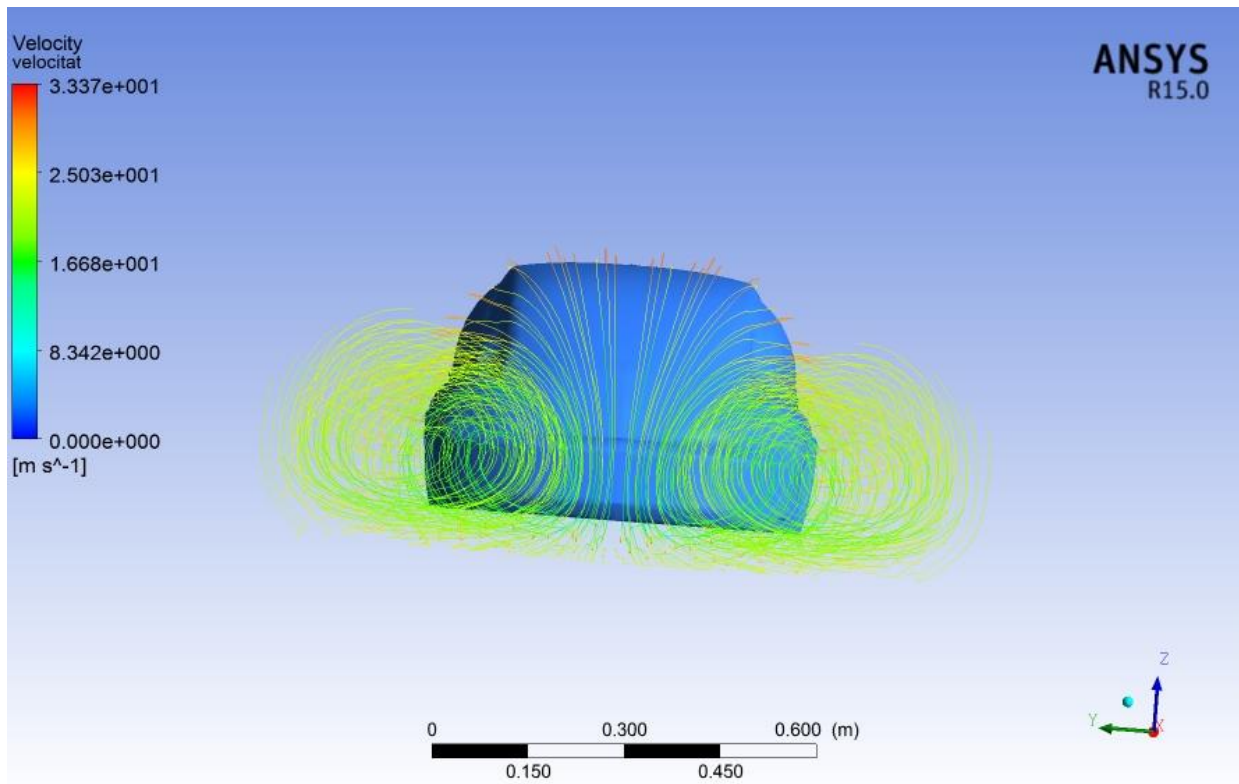


Fig.6.3.3.: Vòrtexs generats pel vehicle capotat



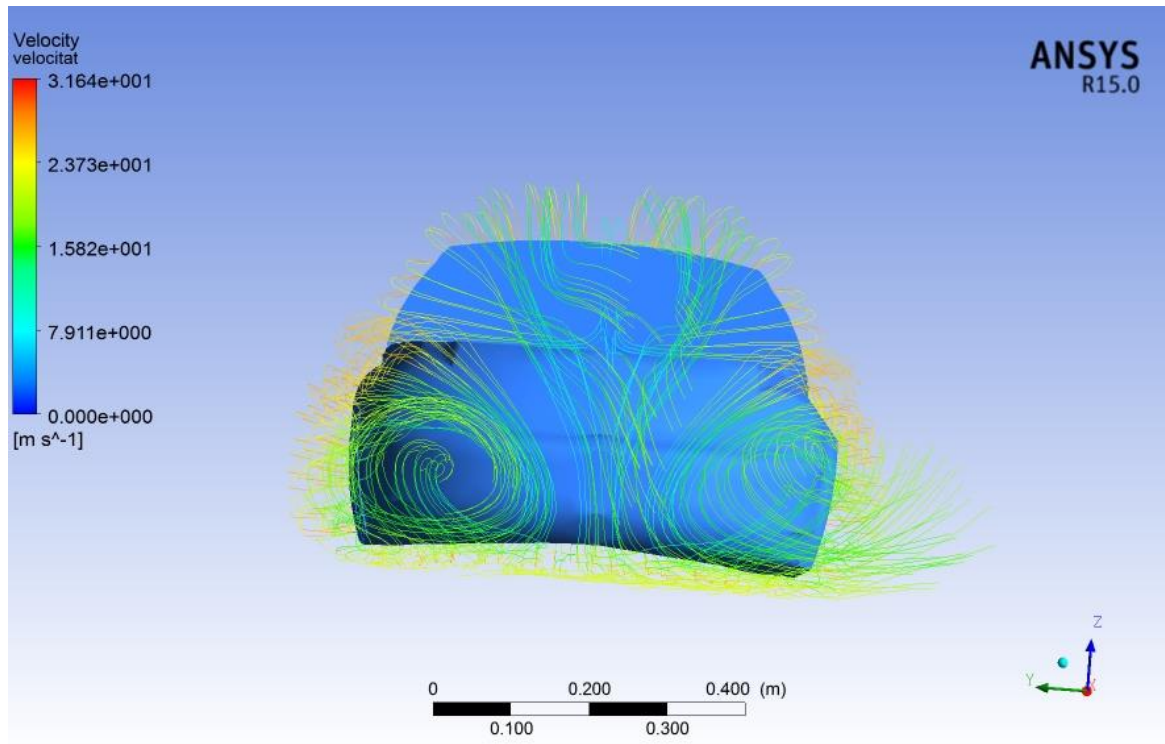


Fig.6.3.4.: Vòrtexs generats pel vehicle descapotable

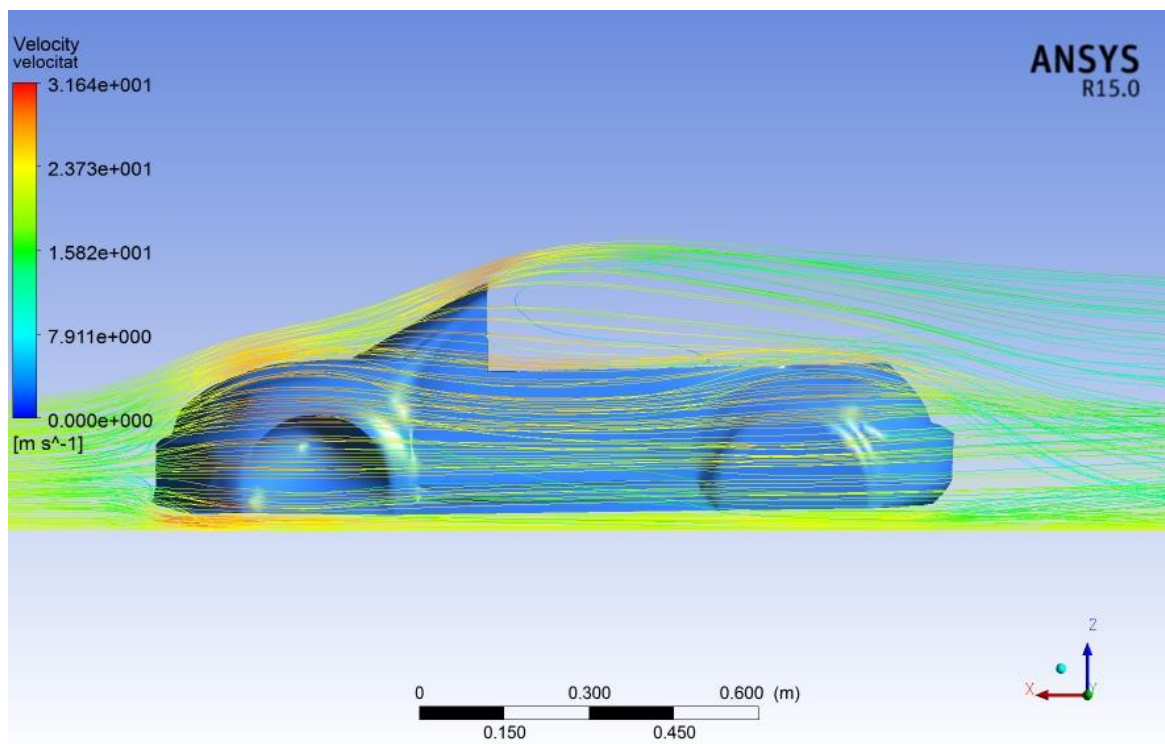


Fig.6.3.5.: Trajectòria de l'aire en el vehicle descapotable

En les imatges anteriors on s'observen les velocitats del fluid envers els vehicles, els valors obtinguts van de la mà juntament amb els valors de pressions: on l'aire impacta i provoca un valor major de pressió, la velocitat d'aquest fluid és més baixa. En canvi, en les zones de depressions dels vehicles, on la pressió és negativa, l'aire es veu xuclat per aquella superfície dels vehicles i augmenta la seva celeritat. Concretament, en les zones de depressió màxima, la velocitat del fluid augmenta un 50%, dels 22.22 m/s imposats per l'estudi i per la velocitat de la via on es circula, als 33,33 m/s obtinguts pel *Fluent*.

## 7. Estudi de costos

Tot aquest projecte s'ha realitzat en un període aproximat de menys de 4 mesos, des de la finalització dels exàmens de recuperació fins a l'entrega d'aquest, però per separar aquests temps en els dies que s'ha trigat en assolir cada concepte del treball es realitzarà un diagrama de Gantt. És una eina gràfica útil per a exposar el temps de dedicació d'un projecte, separant cada activitat i quantificant els dies que calen per a finalitzar-la. A més, s'afegeix ordre cronològic en activitats correlatives (no es pot començar l'activitat j sense haver acabat l'activitat i).

Primerament, es mostrarà una taula amb les activitats que s'han desenvolupat per a assolir aquest treball, sabent que l'inici oficial d'aquest projecte fou el 16/07/2016:

ACTIVITAT	DURACIÓ
<b>Aprenentatge eina disseny <i>Catia</i> - A</b>	4 dies: 16/07 - 19/07
<b>Recerca d'informació - B</b>	26 dies: 18/07 - 07/08 i 13/08 - 18/08
<b>Elecció del vehicle a dissenyar - C</b>	3 dies: 22/07 - 24/07
<b>Recerca de plànols - D</b>	3 dies: 25/07 - 27/07
<b>Disseny vehicle capotat - E1</b>	23 dies: 01/08 - 12/08 i 22/08 - 01/09
<b>Disseny vehicle descapotable - E2</b>	3 dies: 02/09 - 04/09
<b>Aprenentatge eina <i>Fluent</i> - F</b>	3 dies: 03/09 - 05/09
<b>Mallat dels vehicles - G</b>	2 dies : 06/09 - 07/09
<b>Anàlisi aerodinàmic dels vehicles - H</b>	5 dies: 08/09 - 12/09
<b>Anàlisi resultats - I</b>	3 dies: 13/09-15/09
<b>Composició de la memòria - J</b>	constant
<b>Estudi de costos - K</b>	2 dies: 17/09-18/09

Taula 7.1: Activitats del projecte

Cal observar que entre el 12 d'agost i el 22 d'agost no es va realitzar "feina" més que buscar informació, un cop avançat en el projecte. Això és degut a què es va gaudir de vacances una setmana i només es va poder realitzar recerca d'informació.

Com aquesta aturada en el procés del projecte pot ocasionar dificultats a l'hora de realitzar el diagrama de Gantt, el que es farà és separar la recerca d'informació en dues activitats: B<sup>1</sup> i B<sup>2</sup>

L'eina que s'ha usat per a realitzar el diagrama de Gantt ha estat l'eina *Microsoft Excel*, ja que és molt pràctica i còmode a l'hora de treballar-hi.

A continuació, es mostra el diagrama de temps realitzat en aquest projecte:



Fig7.2.: Diagrama de Gantt del projecte

Un cop estudiat el temps dedicat al projecte, ara es calcularà de manera aproximada la remuneració econòmica que podríem percebre amb les hores destinades a aquest. Seguint l'ordre d'activitats, podem separar el projecte en N grups:

Primerament, pel que fa l'aprenentatge i la recerca general d'informació (activitats A,B,C,D i F) és un procés que s'ha decidit no cobrar, ja que no forma part de la despesa que hauria d'afrontar la persona que ens demanés la realització d'aquest projecte. Ja que actualment em dedico al disseny industrial, s'ha optat per a imposar el mateix preu hora que percebo en les tasques que desenvolupo, ja que són molt semblants.

Destinant 5 hores al dia entre setmana els mesos de juliol i agost (degut a què es realitzava jornada intensiva laboral), 3 hores diàries entre setmana a partir de setembre (ja que l'horari no podia ser més extens degut a la jornada laboral normal) i 12 hores els caps de setmana - amb el mateix preu hora - el total de les hores destinades a disseny industrial (E1 i E2) han estat 136 hores. Aplicant un preu de 10€/h bruts, que resulten 8.88€/h nets - amb una cotització del 2.53% en I.R.P.F. i 6.35% en S.Social -, resulta uns ingressos després d'impostos de 1207.68€.

Amb el disseny d'ambdós vehicles, el temps que s'ha destinat al *Fluent* (activitats G,H i I), que s'han cobrat al mateix preu, sumen un total de 52 hores, que representen uns ingressos de 461.76€.

La composició de la memòria resulta inclosa en les hores anteriors, tot i que hi ha parts de teoria escrites al treball fruit de la recerca d'informació, la qual no s'ha comptabilitzat. És per això que la recerca de la memòria no es tindrà en compte a efectes pràctics en el líquid a percebre.

Per últim, l'estudi de costos s'ha realitzat en no més de 8 hores, fet que suposa un preu de 70€ aproximadament.



Caldria incloure uns costos extraordinaris, no mostrats en la figura anterior 8.2 d'activitats de projecte, que serien les amortitzacions i el preu dels programes informàtics, els quals són els següents: Una llicència d'*Ansys* amb el *Fluent* té un valor de mercat de 26.500€ (preu empresa) i una llicència de *Catia* no arriba als 20.000€ (preu empresa). Ha estat impossible conèixer el preu de llicència per a un individu, per tant es treballarà amb aquestes dades.

Considerant un preu de 50€/h nets tant per *Catia* com per *Ansys*- per a amortitzar el preu de la llicència - i tenint en compte que el temps destinat ha resultat de 136 + 52 hores, el resultat de l'exercici dels costos extraordinaris arriba a la suma de 9400€.

Pel que fa als costos administratius – impressió de la memòria, gravat de la memòria en format disc i material d'oficina – ofimàtics – preu software – i a l'amortització de l'ordinador amb el qual s'ha treballat, caldria desglossar els següents preus:

- L'ordinador ha treballat un total de 383,5 hores, amb una potència activa destinada de 0,075 kW. Amb el preu que cobren l'electricitat, que és 0,18€/kWh, resulta un valor de 5,18€. L'amortització d'aquest es calcula de la següent manera: Es va comprar l'ordinador a inici de la universitat, el setembre del 2010, per un valor de 999€. Calculant una vida útil de 10 anys (segons estudis de l'empresa *HP*), caldria abonar un total de 99,9€ . El global de l'amortització de l'ordinador resulta 105,08€
- La impressió de la memòria i comprar els cd's per a gravar-la ha costat un total de 13,5€. L'ús de fulls i bolígrafs no s'ha comptabilitzat.

Tot això es recull a la següent taula:

Concepte	Preu/hora	Temps dedicat	Subtotal
Disseny Vehicles (1)	8.88€/h	136h	1207.68€
Anàlisi CFD (2)	8.88€/h	52h	461.76€
Licensing	50€/h	(1) + (2) = 188h	9400€
Estudi de Costos	8.88€/h	7.5h	70€
Amortitzacions	-	-	105,08€
TOTAL ABANS D'INTERESSOS	-	-	11244,52€ (3)
I.V.A (21%) de (3)	-	-	2361,35€ (4)
<b>COST PROJECTE (3) + (4)</b>	-	-	<b>13605,87€</b>

Taula 7.2.: Costos globals

A continuació, es mostra detalladament com es reparteixen aquests valors en tant per cent en el següent gràfic:

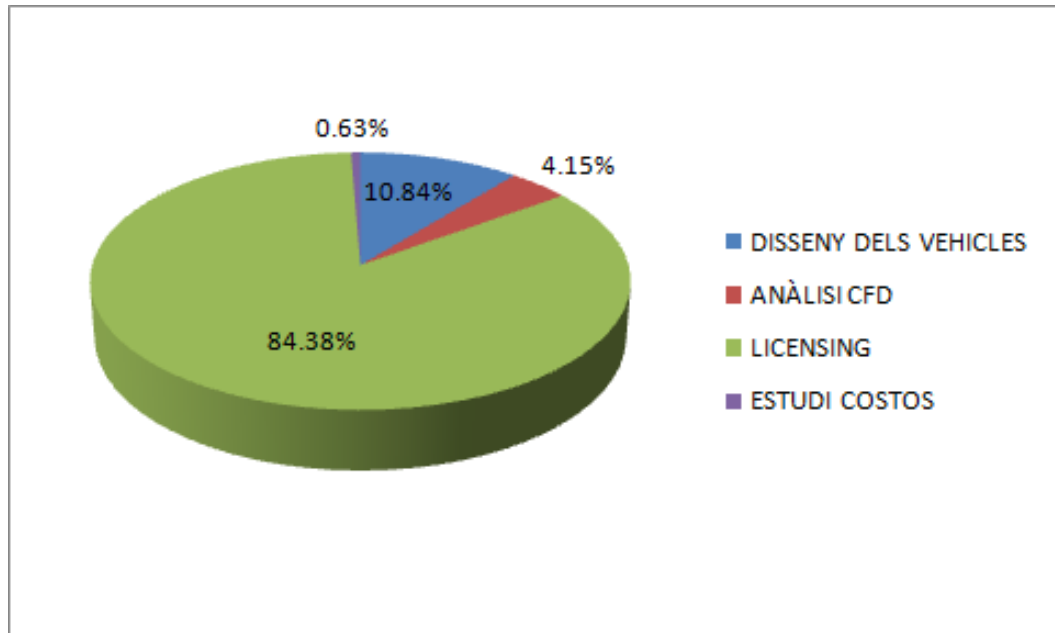


Fig.7.3.: Gràfic tipus pastís dels percentatges repartits en el pressupost del projecte

Com es pot observar, les llicències dels programes són el que han augmentat de manera molt rellevant el preu total del projecte, ja que suposen gairebé un 85% del preu global. El disseny del vehicle és el següent aspecte que més temps i cost ha esdevingut en la realització del projecte. Es pot dir que tant el *Licensing* com el disseny dels vehicles són els productes A i B<sup>31</sup> del projecte.

Els beneficis a obtenir en aquest projecte són els següents:

En primer lloc, el disseny dels vehicles, els estudis CFD i l'estudi de costos són ingressos nets, és a dir, fruit de la formació de l'enginyer. No cal pagar amortitzacions ni preus de llicència, és un ingrés íntegre a la formació industrial. Per tant, els 1207,68€ del disseny més els 461,76€ dels anàlisis CFD més els 70€ de l'estudi de costos – en total 1740€ - són ingressos de formació pròpia. La resta d'importos serveixen per a pagar llicències i amortitzacions de producte.

---

Producte A i B: Producte que suposa el 80% del cost del projecte i el 10%, respectivament. Junts formen el 90% dels costos globals

## 8. Impacte Mediambiental

La part de l'enginyeria que es dedica al disseny industrial no realitza estudis d'impacte ambiental ja que es treballa fonamentalment amb programes informàtics. A més, comparats amb d'altres departaments d'una empresa industrial que contingui un departament de disseny industrial, l'impacte ambiental és mínim.

Tot i això, cal destacar un aspecte fonamental: el fet de dissenyar els vehicles i llançar anàlisis amb ordinador implica menys hores de simulació real amb els prototips de vehicles en un circuit tancat, i això provoca menys emissions de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera.

Al dissenyar aquests vehicles i simular-los en ordinador s'estalvia l'ús del túnel de vent per a obtenir els valors dels coeficients aerodinàmics: Un túnel de vent de les dimensions necessàries per a poder abastir un vehicle pot arribar a consumir entre 2 i 3 MW/h d'energia elèctrica, fet que suposa un estalvi d'entre 0,93 i 1,39 tones de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera [12].

## 9. Conclusions i possibles millores

Arribats a aquest punt, cal realitzar una valoració del treball realitzat: per començar, s'ha complert l'objectiu bàsic del projecte: implementar els coneixements adquirits de mecànica de fluids en un estudi de dos vehicles reals. Les empreses que es dediquen a aquest tipus de projectes segueixen aproximadament el mateix procés realitzat en aquest treball, fet que implica un *modus operandi* adequat de les tasques realitzades.

Cal anotar que l'ús de l'eina *Catia* ha provocat hores d'aprenentatge que no només serviran per a la realització d'aquest projecte, sinó que a nivell laboral ajudaran molt per a conèixer eines internes (*fill*, *joint*,...) que no es coneixien anteriorment i que resulten ser molt útils.

El procediment ha estat realitzar un disseny ajudat amb els *blueprints* per a acurar el sòlid al màxim al vehicle real. El descapotable s'ha dissenyat amb el vehicle capotat i s'ha realitzat una extrusió semblant al vehicle descapotable real. Un cop obtinguts els vehicles, s'ha introduït al *Workbench* de l'*Ansys* per a realitzar un mallat tant del vehicle com de l'entorn. S'ha realitzat un mallat específic a la superfície del sòlid per a poder observar el fenomen del desprendiment de la capa límit. Amb això, s'ha realitzat una simulació fluidodinàmica amb un flux d'aire que impacta a l'àrea frontal dels vehicles de manera ortogonal per a veure com es desvia l'esmentat flux. Per últim, s'ha obtingut els resultats de  $C_D$  i  $C_L$  i s'han corroborat amb la hipòtesi inicial, on es comentava que el descapotable tindria pitjors coeficients aerodinàmics.

El següent pas, fora de l'abast d'aquest projecte, seria construir una maqueta de la pell dels vehicles a escala 1:1 i comparar els resultats obtinguts amb la simulació numèrica, tot i que com s'està treballant amb nombre de Reynolds semblant obtindríem valors similars.

Pel que fa a les possibles millores dels vehicles, cal deixar escrit que aquest projecte es podria millorar amb un aspecte fonamental: ha estat impossible construir les rodes dels vehicles, ja que quan el mallat del *Ansys* es trobava amb dues superfícies que xocaven (roda amb xassís lateral) i existia una corba de contacte, no es podia fer el mallat. Apart, es podria millorar el vehicle descapotable fent-li seients i retocar la part superior descapotable, però com abans, no permetia un mallat amb una superfície final corba.

A partir d'aquí, un cop observat el procés de realització d'aquest treball, cal justificar els resultats obtinguts: El vehicle capotat atorga uns resultats més fiables i comuns segons els valors que entrega l'*Ansys* que no pas el vehicle descapotat: aquest fet es pot observar en els gràfics de  $C_D$ ,  $C_L$  i  $C_M$ . Les primeres 100 iteracions acaben convergint en un punt molt proper al resultat final obtingut per les 500 següents iteracions. Per contra, en el vehicle descapotable, els valors de les 100 primeres iteracions oscil·len fins a finalment convergir en les següents 500 iteracions.

Per altra banda, l'eficiència obtinguda en el vehicle descapotat, voltant a l'1, és un valor proper a la realitat i físicament possible. Per contra, el vehicle descapotable ens dóna un valor certament estrany, fora dels límits del que s'esperava obtenir des d'un principi.

També cal corroborar la hipòtesi inicial amb la qual partíem aquest projecte: el *drag* del vehicle descapotable serà més elevat que el del vehicle capotat. S'ha demostrat la hipòtesi inicial, però s'ha obtingut una comparativa dels *lift* de cada vehicle novament estranya.

## **Agraïments**

M'agradaria agrair, en primer lloc, al professor Enric Trillas Gay, per recomanar-me aquest treball a inicis del quadrimestre: L'atenció rebuda ha estat sempre excel·lent, la dedicació d'hores que m'ha destinat ha estat molt valorada i, tot i no veure'ns amb freqüència i comunicar-nos pràcticament via *mail*, m'he sentit molt recolzat i atent per la seva part.

M'agradaria agrair també l'ajuda de la meva mare que, gràcies únicament a ella i a la seva feina per a tirar-me endavant, avui en dia ens trobem presentant un treball de fi de grau després de 6 anys llargs d'entrebancs i dificultats.

No voldria oblidar-me dels consells rebuts de l'Abel Gonzàlez Martín, els quals han estat de gran ajuda per a tirar endavant aquest projecte i per les hores de temps lliure que ha decidit dedicar-me de manera totalment altruista.

Evidentment no m'oblido de l'Anna Matas Alsina, la meva companya de viatge, a qui he entregat el meu cor, qui tant m'ha ajudat en diversos aspectes de la vida, i que gràcies a ella avui també som aquí.

### **Bibliografia i webgrafia**

- [1] BARLOW, B. J.; RAE W. H., POPE A. (1999). LowSpeedWindTunnelTesting
- [2] ANSYS, Inc. Lecture 03: Introduction to the CFD Methodology and CFX, 2012
- [3] COOK, N. J. Determination of the Model Scale Factor in Wind-TunnelSimulations of theAdiabaticAtmospheric.
- [4] HINZE, J.O. Turbulence.
- [5] WITTEWER, ADRIÁN; MARIO E. DE BORTOLI, M. B. NATALINI. Variación de los parámetroscaracterísticos de una simulación de la capa límiteatmosférica en un túnel de viento.
- [6] DELNERO, J. S; MARAÑÓN DI LEO, J.; BACCHI, F. A.; COLMAN, J. & COLOSQUI, C. E. Determinación experimental en túnel de capa límite de los coeficientesaerodinámicos de perfiles de bajos Reynolds.
- [7] DELNERO, J.S.; J. COLMAN, U. BOLDES, M. MARTÍNEZ, J. MARAÑÓN DI LEO and F.A. BACCHI. About the turbulent scale dependent response of reflexed airfoils.
- [8] CDF online: <http://www.cfd-online.com>
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=HyxR5sJk-gU> – Ansys/CFD (Fluent)
- [10] <https://www.fing.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel.html> - Túnel de Vent
- [11] <http://www.ventusciencia.com/pdfs/13620.pdf> - Túnel de Vent: Exemple
- [12] <http://www.ada-c.com/es/conversor-co2.html> - Conversor KWh/Tn CO<sub>2</sub>

### Figures externes al projecte

[1] Fig.4.1.1.: Força realitzada per un fluid - aire - en funció de la velocitat [1]:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_aerodinámica](https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_aerodinámica)

[2] Fig.4.2.1.: Valor de  $C_D$  en funció de la geometria on impacta el fluid [2]: Material docent de l'assignatura Mecànica de Fluids

[3] Fig.4.2.2.: Perfil de la capa límit: <http://forum.lawebdefisica.com/threads/24058-Teor%C3%ADa-relaci%C3%B3n-entre-la-conservaci%C3%B3n-del-momento-angular-y-el-empuje-en-una-estructura-al-aer>

[4] Fig.4.3.2.1.: Valor del lift en funció de l'angle del capó [4]:

<http://www.forocepos.com/vbulletin/archive/index.php/t-73355.html>

[5] Fig.4.3.2.2.: Valor  $C_D$  en funció dels angles del parabrises davanter i capó [5]:

[http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009_10_01_archive.html)

[6] Fig.4.3.4.1.: Valor de  $C_D$  en funció de l'angle del parabrises posterior [6]:

[http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009_10_01_archive.html)

[7] Fig.5.2.1.: Exemple del mallat d'un volum de control [7]:

<http://www.pze.es/calcul.php>

